

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

Д. О. Кінь, Н. Ю. Лазоренко, В. С. Онищук

ГЕОДЕЗИЧНІ ПРИЛАДИ

Конспект лекцій
для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти спеціальності
193 «Геодезія та землеустрій»

Київ 2024

УДК 528.517 (075.8)

К71

Рецензент Ю.О. Карпінський, д-р техн. наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри геоінформатики і
фотограмметрії протокол № 2 від 28 серпня 2024 року.*

В авторській редакції.

Кінь Д.О.

К71

Геодезичні прилади [Електронний ресурс]: конспект лекцій /
Д.О. Кінь, Н. Ю. Лазоренко, В.С. Онищук. – Київ : КНУБА,
2024. – 173 с.

Розглянуто теорію електронних методів визначення віддалей,
напрямків і кутів, описано сучасні електронні геодезичні прилади і
системи, в яких реалізовано ці методи, а саме світловіддалеміри,
електронні теодоліти, тахеометри, нівеліри, інтерферометри,
лазерні сканери та ін. Під час викладення матеріалу використані і
пояснені необхідні поняття та закони з фізики та електроніки.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій».

УДК 528.517 (075.8)

© Д.О. Кінь, Н.Ю. Лазоренко,

В.С. Онищук, 2024

© КНУБА, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗБИРАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ТА ФІЗИКА ЕЛЕКТРОННИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ.....	5
Лекція 1. Вступ до дисципліни	5
Лекції 2, 3. Методи збирання геопросторових даних сучасними геодезичними приладами	7
Лекція 4. Електромагнітні коливання і хвилі. Методи вимірювання віддалей.....	21
Лекція 5. Електронні вимірювання відстаней.....	38
Лекція 6. Електронні вимірювання кутів.....	60
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. БУДОВА ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ ТАХЕОМЕТРІВ, ЕЛЕКТРОННИХ НІВЕЛІРІВ ТА ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ	81
Лекції 7, 8. Електронні тахеометри	81
Лекція 9. Цифрові нівеліри	97
Лекція 10. Лазерні сканери	113
ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. ОСНОВИ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ПРОГРАМНІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ.....	129
Лекція 11. Інтерферометричні методи. Супутникове позиціонування.....	129
Лекція 12. Радіоінтерферометрія з наддовгою базою (РНДБ)	139
Лекція 13. Супутникове геодезичне обладнання	145
Лекції 14,15. Програмне забезпечення Digital для опрацювання геодезичних вимірювань	161
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	169

ВСТУП

Конспект лекцій підготовлено відповідно до розділів програми з навчальної дисципліни «Геодезичні прилади» освітньо-професійної програми КНУБА з підготовки здобувачів вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій» спеціалізаціями «Геоінформаційні системи і технології», «Геодезія», «Землеустрій і кадастр» для очної та заочної форм навчання.

До основних дисциплін, що сприятимуть засвоєнню завдань та змісту робіт з електронними геодезичними приладами, належать інформатика і програмування, основи геодезії, фізика.

Метою цього конспекту лекцій є посилення компетентностей щодо застосування теорії, принципів, методів та підходів фізико-математичних наук, які лежать в основі роботи геодезичних електронних приладів, а також застосування цих приладів під час виконання завдань геодезії та землеустрою. Це навчальне видання забезпечує здобувачу вищої освіти професійними знаннями про роботу з електронними геодезичними приладами, спеціалізованим програмним забезпеченням для опрацювання результатів вимірювань, застосування різних сучасних методів збирання геопросторових даних залежно від виду робіт та вимог, які висуваються до кінцевого продукту. Оскільки якість геодезичних вимірювань залежить не тільки від якості та можливостей сучасних геодезичних приладів, які використовуються на різних стадіях виконання геодезичних робіт, а й від знань та досвіду майбутнього сертифікованого спеціаліста цих робіт, тому основним завданням освітньої компоненти «Геодезичні прилади» є ознайомлення, поглиблення та розширення знань здобувачів вищої освіти про конструкцію, особливості експлуатації та функціональні можливості сучасних електронних геодезичних приладів.

Конспект складається з трьох змістових модулів, що містять 12 тем, які є матеріалами для 15 лекцій, починаючи від визначення основних фізичних понять і законів, на основі яких конструюються та працюють всі електронні геодезичні прилади, детального вивчення будови, призначення та функціональних можливостей різних типів приладів різного класу точності, і до опрацювання результатів вимірювань у спеціалізованих програмних забезпеченнях.

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗБИРАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ТА ФІЗИКА ЕЛЕКТРОННИХ ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРИЛАДІВ

Лекція 1. Вступ до дисципліни

Геодезичний прилад – прилад, призначений для використання в геодезії відповідно до ДСТУ 2402-94 «Прилади геодезичні. Терміни та визначення».

Сучасний геодезичний прилад – це високоточний оптично-механічний електронний комп'ютеризований прилад, робота якого найменшою мірою залежить від впливу на нього зовнішніх умов.

Геодезичні прилади – прикладна інженерно-технічна дисципліна, що займається вивченням теорії, будови, призначення, методів дослідження геодезичних приладів та їхніх окремих елементів. Геодезичне приладобудування і геодезія розвиваються невідривно одне від одної, адже геодезія під час розроблення нових методів вимірювань та організації робіт враховує можливості приладів і навпаки геодезичні прилади враховують вимоги геодезії до точності та продуктивності праці під час топографо-геодезичних і вишукувальних робіт. Сучасне геодезичне виробництво потребує швидких, точних і автоматизованих рішень для вирішення прикладних геодезичних задач.

Перехід від оптико-механічних до електронних приладів відбувся завдяки впровадженню електроніки в геодезію в 40-50 роках ХХ століття. На основі теорії електромагнітних коливань і хвиль були побудовані перші світловіддалеміри для вимірювання відстаней під час побудови геодезичних мереж. Значні зміни у віддалемірній техніці відбулися завдяки винайденню і використанню газових та напівпровідникових лазерів та світлодіодів, почався масовий випуск світло- та радіовіддалемірів, що в свою чергу забезпечило широко використовувати методи полігонометрії, трилатерації та лінійно-кутової триангуляції.

Використання лазерів, бурхливий розвиток мікроелектроніки і обчислювальної техніки забезпечило створення і розвиток сучасних комп'ютерних технологій, які в свою чергу необхідні для автоматизації геодезичних вимірювань. У 80-х роках ХХ століття успішно займалися автоматизацією процесів лінійних вимірювань за допомогою

світловіддалемірів, далі ці здобутки використовувалися у кутових вимірюваннях та нівелюванні.

Створення глобальних супутникових навігаційно-геодезичних систем типу GPS і ГЛОНАСС здійснило революцію в геодезичних методах вимірювань. В минуле відходять трудомісткі геодезичні роботи з побудови опорних планово-висотних геодезичних мереж з побудовою центрів та спеціальних геодезичних знаків над ними для забезпечення видимості між пунктами геодезичної мережі. Використання одного супутникового приймача забезпечує визначення координат його місцеположення з точністю до метрів, що є достатнім для багатьох навігаційних задач, а двох супутникових приймачів забезпечує отримання координат взаємного положення з точністю до сантиметрів і навіть міліметрів. Тобто супутникові системи забезпечують створення опорних мереж, виконання знімальних і прив'язочних робіт більш ефективно в порівнянні з традиційними методами.

Сучасний геодезичний прилад – це високоточний оптично-механічний електронний комп'ютеризований прилад, робота якого найменшою мірою залежить від впливу на нього зовнішніх умов. Електронні прилади виготовляють провідні фірми світу: "Topcon", "Trimble", "Sokkia", "Leica" та ін. Кожна лінійка геодезичних приладів має ряд конструктивних та експлуатаційних особливостей.

Застосування сучасних електронних геодезичних приладів значно знижує трудові затрати і збільшує продуктивність праці для виконання топографо-геодезичних, вишукувальних та землепорядних робіт.

Лекції 2, 3. Методи збирання геопросторових даних сучасними геодезичними приладами

У теперішній час нормативними документами, які регламентують проведення топографо-геодезичні і картографічні роботи є:

- Порядок загальнодержавного топографічного і тематичного картографування, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 4 вересня 2013 р. № 661;

- Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000, затверджені наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру України №156 від 31.12.1999 р. і погоджені з Воєнно- топографічним управлінням Генерального штабу Збройних сил України);

- Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98), Затверджений Наказом Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України від 9 квітня 1998 р. № 56 та зареєстрований в Міністерстві юстиції України 23 червня 1998 р. за № 393/2833.

Суміжним документом є Порядок використання Державної геодезичної референцної системи координат УСК-2000 при здійсненні робіт із землеустрою, затверджений Наказом Міністерства аграрної політики та продовольства України від 02.12.2016 № 509 та зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 19 грудня 2016 р. за № 1646/29776.

Протягом багатьох років технологічні схеми топографічних знімачів, приведені в цих нормативно-технічних документах [12] відповідали високому рівню інфраструктури картографічного виробництва, створеної в Радянському Союзі і в перші роки незалежності України (рис. 1.1, 1.2) [12].

11 лютого 2010 року був прийнятий закон України “Про внесення змін до Закону України “Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність”. Цим Законом серед інших новацій передбачено, що виконання загальнодержавних топографо-геодезичних і картографічних робіт організовує і координує спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади з питань топографо-геодезичної і картографічної діяльності на основі встановленого Кабінетом Міністрів

України Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування, який було затверджено Постановою № 661 КМУ від 4 вересня 2013 року. Вперше в Законі України йдеться про державні топографічні та тематичні карти. Набуття такого статусу топографічних та тематичних карт вимагає значного підвищення їх інформаційно-технологічного рівня.

Очевидно, що діючі нормативно-технічні документи в галузі топографічного картографування не враховують сучасні методи топографічного знімання, не відповідають сучасному рівню розвитку геоінформаційних технологій та не задовольняють вимоги суспільства в якості, оперативності та достовірності геопросторових даних. По суті справи діючі нормативно-технічні документи по топографічному картографуванню місцевості не тільки гальмують процес впровадження новітніх технологій, а навіть є перешкодою, бар'єром на шляху їх використання.

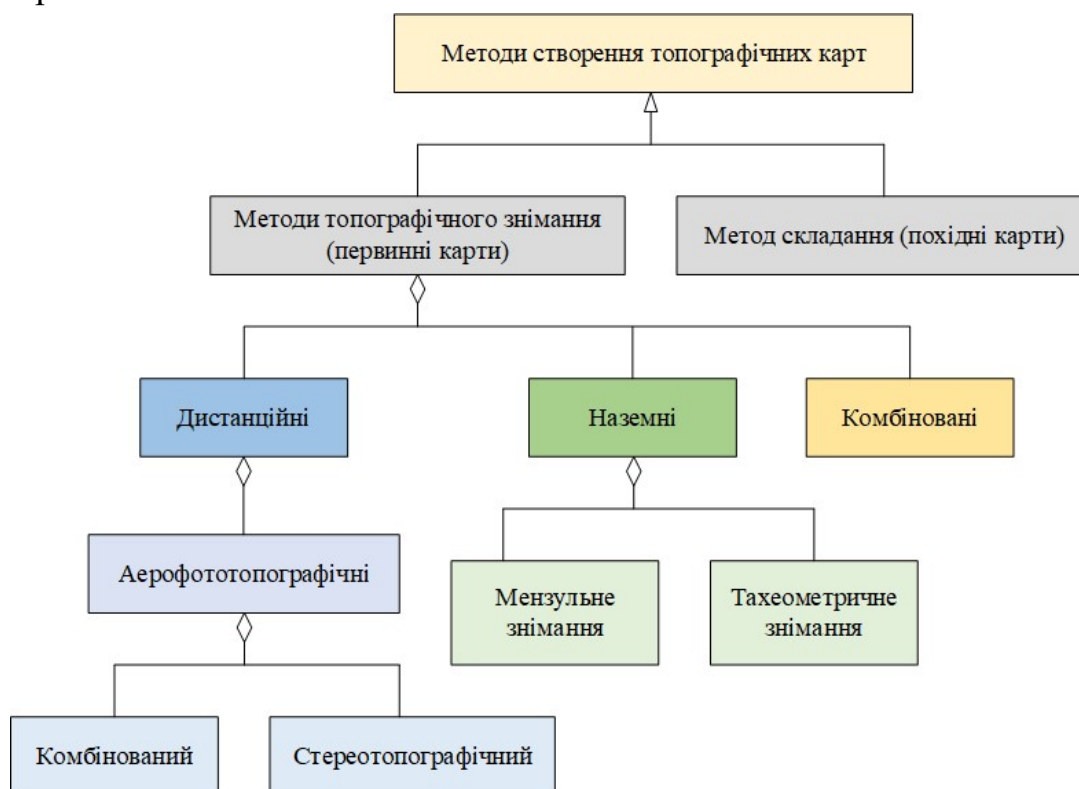


Рис. 1.1. UML – діаграма створення топографічних карт за Основними положеннями створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1:1 000 000

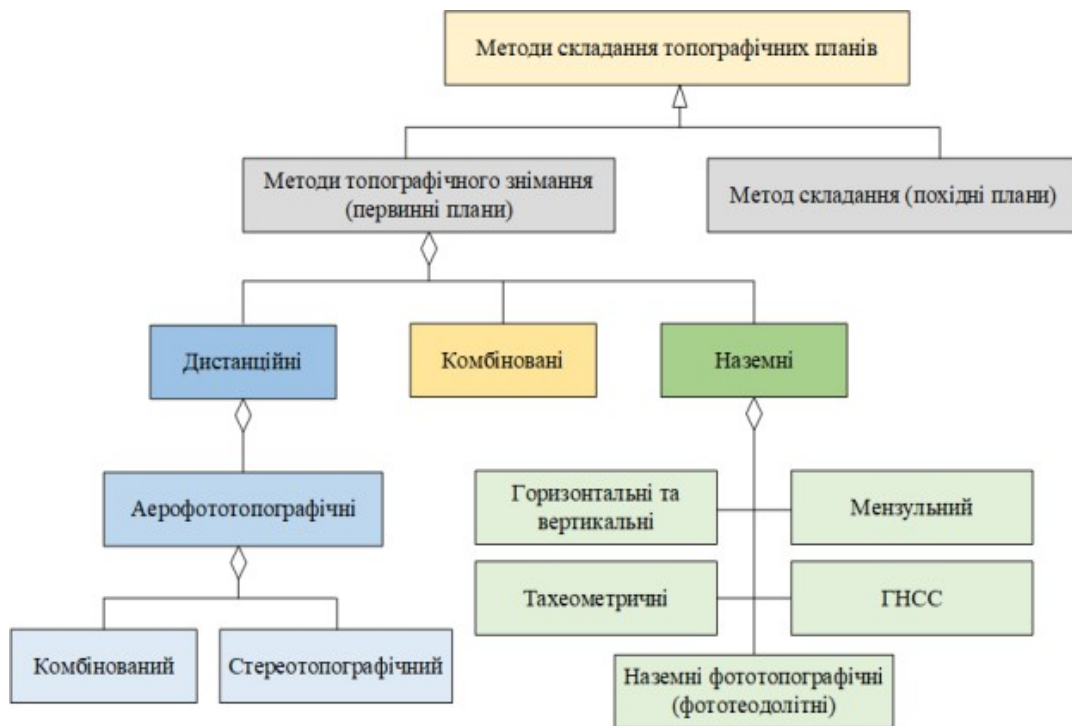


Рис. 1.2. UML – діаграма методів створення топографічних планів за Основними положеннями створення топографічних планів масштабів 1:5000, 1:2 000, 1 :1 000 та 1:500

Нині основні тенденції розвитку топографо-геодезичної та картографічної діяльності обумовлюються розвитком інформаційних технологій, зокрема, глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) визначення місцезнаходження об'єктів, аерокосмічних систем високої роздільної здатності для отримання інформації про Землю, створення високопродуктивних засобів отримання просторової інформації про Землю в режимі реального часу на основі систем оптико-електронного сканування місцевості, супутникової радіолокації, лазерної локації наземного та повітряного базування, цифрового аерофотознімання включаючи безпілотні літальні апарати, неметричні фотокамери, піктографічне знімання для створення реалістичних моделей місцевості, цифрових методів обробки зображень та геопросторової інформації, широкого використання геоінформаційних систем і телекомунікаційних технологій як основного засобу забезпечення доступу суспільства до геопросторових даних та інформації тощо.

Такий вплив інформаційних технологій на розвиток топографо-геодезичної та картографічної діяльності визначив необхідність переходу від інфраструктури картографічного виробництва до розбудови інфраструктур геопросторових даних [12].

Наземні методи знімання. До сучасних наземних методів топографічних знімань відносяться (рис. 1.3):

- горизонтальні та вертикальні знімання: планові, висотні, планово-висотні;
- тахеометричне знімання;
- знімання за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС);
- наземна фотограмметричне знімання та лазерне сканування;
- мобільні картографічні системи та інерціальні навігаційні системи.

Горизонтальні, вертикальні та тахеометричне знімання.

Сучасні моделі високоточних електронних та роботизованих теодолітів, тахеометрів, нівелірів забезпечують відповідно виконувати кутові вимірювання з точністю до 0,5'' – 1'', 2'', вимірювання відстаней до 1 міліметра чи кількох міліметрів на один кілометр та вимірювання перевищень на 1 км подвійного ходу від 0,3 до 1 мм в залежності від виду рейки, що використовується. Безумовно, це впливає на величини допусків для розвитку знімальних геодезичних мереж та всіх видів тахеометричних знімань.

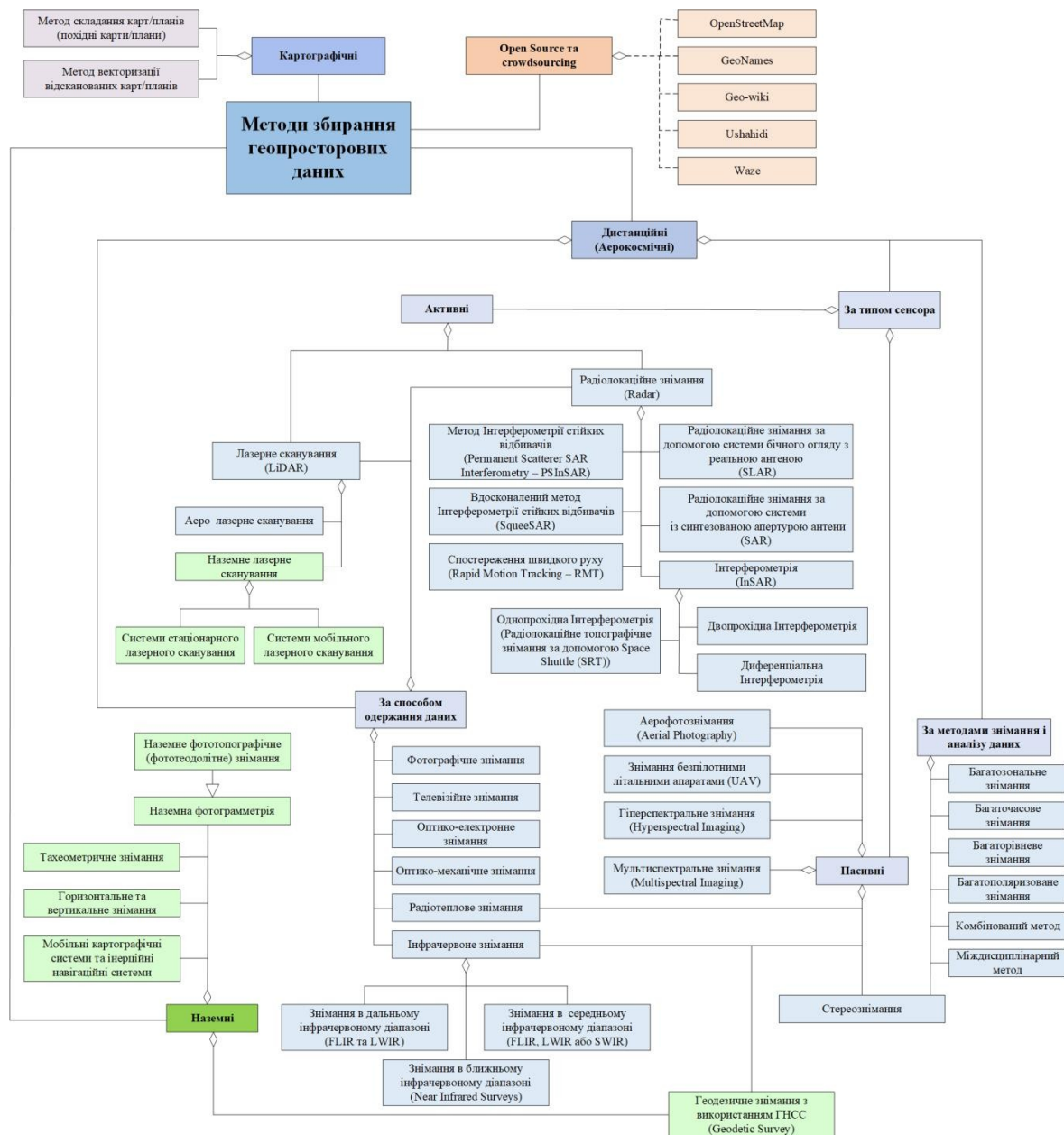


Рис. 1.3. UML – діаграма класифікації сучасних методів збирання геопросторових даних

Знімання за методами ГНСС. Розвиток глобальних супутникових геодезичних систем (ГНСС) типу GPS (США), ГЛОНАСС (Росія) та нових Compass (Китай), Galileo (Європейський Союз) здійснило революцію в геодезичних методах вимірювань. ГНСС – інфраструктура, яка включає плеяду орбітальних супутникових станцій з глобальним покриттям, які працюють у поєднанні з мережею наземних станцій і супутникових систем диференціальної корекції дає змогу визначати географічне положення, відстань, напрям, швидкість руху і місцевий час приймача- користувача в будь-якому місці земної

поверхні чи в повітрі за допомогою опрацювання сигналів отриманих від супутників у космосі. Особливої уваги заслуговує кінематичне знімання у режимі реального часу (Real Time Kinematic – RTK) та кінематичної постобробки (Post-Processed Kinematic – PPK), оскільки ці методи дають можливість виконувати знімання великої кількості точок за менший відрізок часу з горизонтальною точністю $1\text{ см} + 2\text{ ppm}$ та вертикальною $2\text{ см} + 2\text{ ppm}$. Розвитку цих методів сприяє розбудова в Україні мереж активних референтних станцій ГНСС.

Комбіновані методи створення знімальних мереж та наземних знімальних. Поєднання електронних тахеометрів з ГНСС (SmartStation) спричинило потребу в значній зміні до самих підходів проектування схем геодезичних знімальних мереж. Комп'ютерне оброблення геодезичних мереж повністю перейшло на застосування строгих параметричних методів вирівнювань з визначенням повних кореляційних матриць та тотальною оцінкою точності всіх елементів мережі. По суті справи, традиційна побудова геодезичних мереж методами полігонометрії, тріангуляції, трилатерації зазнала трансформації у побудову лінійно-кутових мереж у поєднанні з вимірюваннями методами ГНСС. Це потребує кардинальних змін у розробленні схем розвитку знімальних геодезичних мереж, перегляду всієї точносної моделі та допусків на них.

Методи наземної фотограмметрії. Технологія наземного фототеодолітного знімання, яка донедавна широко використовувалась для отримання топографічних планів місцевості (особливо для відкритих місцевостей зі складними формами рельєфу) у заданому масштабі, для архітектурних обмірів пам'яток історії та культури поступається відносно новій технології наземного лазерного сканування (НЛС) та комбінації цифрової фотограмметрії з НЛС.

Методи наземного лазерного сканування та мобільні картографічні системи. Методи наземного лазерного сканування відомі з початку 90-х років минулого століття, потужно розвиваються останні десять років і полягають у вимірюванні з високою швидкістю відстаней від сканера до точок об'єкта та реєстрації відповідних напрямків (вертикальних і горизонтальних кутів), тож величини, що вимірюються аналогічні як і для тахеометричного знімання. Проте на відміну від останнього результатом роботи наземного лазерного сканування є хмара точок (тривимірне зображення – скан) всього

об'єкта, а не окремо виміряні точки. Тому в результаті наземного лазерного сканування отримуються надлишкові виміри, для опрацювання і зберігання яких необхідні потужні комп'ютерні ресурси.

За призначенням метод НЛС поділяють на: системи мобільного лазерного сканування, які застосовують для сканування лінійних об'єктів (залізниць, тунелів, автодоріг) та системи стаціонарного лазерного сканування, які використовуються (залежно від значення відстані) для вирішення багатьох прикладних завдань, таких як моніторинг, топографічне знімання, в промисловості, цивільному будівництві, відтворенні об'єктів тощо. Система мобільного лазерного сканування є різновидом мобільної системи картографування (МСК – з англ. Mobile Mapping System). МСК складається з таких блоків: лазерних сканерів і/або цифрових камер для визначення координат об'єктів дорожньої інфраструктури, ГНСС та інерційної навігаційної системи (ІНС) для орієнтування мобільної картографічної системи. При чому ІНС забезпечує високоточне орієнтування МСК в тих випадках, коли неможливе використання ГНСС (тунелі, щільна забудова тощо). Мобільною платформою основних блоків може бути автомобіль або безпілотний літальний апарат (БПЛА). Точність геопросторових даних отриманих в результаті мобільного лазерного сканування під час створення автомобільних ГІС коливається від метра до десятка сантиметрів, а під час сканування залізничних колій досягає від декількох сантиметрів до міліметрів [12].

Поєднання методів цифрової фотограмметрії та наземного лазерного сканування стало можливим завдяки досягненням в приладобудуванні. Серед сучасних приладів, які об'єднують кілька методів збирання геопросторових даних можна відмітити: наземні лазерні сканери з інтегрованою цифровою камерою (та на додаток інколи з відеокамерою), електронні роботизовані тахеометри з функцією сканування, електронні роботизовані фототахеометри з функцією сканування, наземні лазерні сканери з окремою цифровою камерою, мобільні картографічні системи. При чому МКС поєднує методи наземної фотограмметрії, наземного лазерного сканування, ГНСС та інерційних навігаційних систем. Сучасні електронні роботизовані тахеометри, лазерні трекири можна вважати простим 3D лазерним сканером, які призначені для вимірювання одиничних точок. Отже, зазначені методи вимірювання можуть бути об'єднані,

використовуючи переваги кожного. Лазерні сканери та тахеометри можуть бути оснащені цифровими камерами для отримання справжніх кольорових зображень вимірюваного об'єкта або для опрацювання зображень, наприклад, автоматичного вимірювання цілей або реконструкції поверхні за допомогою опрацювання стереозображень. Також 3D хмари точок, отримані в результаті наземного лазерного сканування можуть бути об'єднані з інформацією зображення різними способами, наприклад, для візуалізації, ідентифікації і вимірювання точок об'єкта, створення ортофотопланів або з метою реєстрації [12].

Дистанційні методи знімання. Вдосконалення технологій збирання геопросторових даних можна відзначити не тільки як у наземних, так і дистанційних зніманнях: аерофотограмметрії та космічному зніманні з високою роздільною здатністю, завдяки чому рівень точності оперативності та отриманих даних зростає.

Залежно від висоти знімання території вирізняють: космічне, аерознімання та знімання безпілотними літальними апаратами (БПЛА – unmanned aerial vehicles (UAVs)).

Традиційно до дистанційних або аерокосмічних методів відносяться ті методи, які забезпечують отримання інформації про об'єкти земної поверхні, явища і процеси з космосу чи повітря і ґрунтуються на неназемній реєстрації електромагнітного випромінювання земної поверхні в різних діапазонах спектра [4]. Ці методи можна класифікувати: за методами знімання і аналізу даних, за способом одержання даних та за типом сенсора. До методів знімання і аналізу даних належать: стереознімання, багатозональне, багаточасове, багаторівневе, багатополяризоване знімання, комбінований та дисциплінарний методи, які детально описані в праці [12].

За способом одержання даних методи поділяються на:

– *Фотографічні знімання* виконуються переважно кадровими (існують ще панорамні і щілинні) аерокосмічними фотографічними знімальними системами у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні. В результаті створюються чорно-білі, кольорові, спектрзональні і багатоспектральні фотозображення на засадах центрального проектування. Фотографічні зображення мають високе розрізнення і використовуються для створення ортофотопланів, топографічних планів у великих і середніх масштабах. Аерофотознімання – один з елементів технології картографування, яка передбачає комп'ютерне опрацювання

аерофотознімків, які попередньо сканують на фотограмметричному сканері з високого розрізнення. Недоліком фотографічного знімання є низька оперативність отримання інформації. У космічному зніманні фотографічні знімальні системи замінили сканувальні системи на ПЗЗ-пристроях, радіолокаційні та інші види систем.

- *Телевізійні знімання* переважно кадровими знімальними системами (у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні), що відтворюють зображення земної поверхні в режимі реального часу як на екрані приймача, так і з магнітних цифрових записів на засадах центрального проектування. Телевізійні зображення мають невисоке просторове розрізнення, тому їх переважно використовують для швидкого оцінювання явищ та процесів, спричинених надзвичайними ситуаціями природного і техногенного характеру.

- *Оптико-електронні знімання* виконуються матричними, лінійковими цифровими знімальними системами, а також багатоспектральними і гіперспектральними сканерами (приймачами сигналів є пристрої із зарядовим зв'язком – так звані ППЗ), розміщених на космічних літальних апаратах та літаках, в оптичному та інфрачервоному діапазоні до 14 мкм. Цифрові зображення будуються оптичним способом у межах ПЗЗ лінійки або матриці на засадах центрального проектування. Якщо використовують ПЗЗ-лінійки, то зображення будується у межах рядка на засадах центрального проектування вздовж рядка. Цифрові зображення отримуються в режимі реального часу і відрізняються високим просторовим розрізненням, що дає можливість їх використовувати для вирішення багатьох прикладних завдань.

- *Оптико-механічне знімання або сканування* виконуються оптико-механічними та багатоспектральними сканерами, інфрачервоними (сканувальними радіометрами), матричними та лінійковими знімальними системами в оптичному, середньому та дальньому інфрачервоному діапазоні. На відміну від фотографічних, телевізійних та оптико-електронних систем, в яких зображення будується в кадрі одночасно, у сканувальних знімальних системах спочатку сканується об'єкт, елементи зображення отримують послідовно, після чого вони приводяться у формат кадру. Панорама зображення складається з рядків і отримується в результаті лінійного проектування, конічної розгортки, панорамної розгортки, в дуже рідкісних випадках

застосовується центральне проектування і центральне проектування вздовж рядка.

– *Інфрачервоні (теплові)* знімання виконуються інфрачервоними аерокосмічними знімальними системами, тепловізорами, сканувальними радіометрами в середньому та дальньому інфрачервоному діапазоні спектра. Зображення створюються за рахунок власного випромінювання об'єктів і частково відбитого від них інфрачервоним випромінюванням інших джерел на засадах панорамного проектування. Перевагою цих знімачів є можливість застосовувати їх як в денний так і в нічний час доби. Хоча знімки, які отримані в нічний період доби правдивіше характеризують теплове зображення об'єктів, тому що значна кількість відбитого випромінювання вдень значно зменшує теплове зображення. Результати знімання можна використовувати не лише для розпізнавання об'єктів, а й для вивчення динаміки процесів і явищ (розвиток міст, в завданнях охорони довкілля) завдяки додатковим дешифрувальним можливостям.

Зокрема інфрачервоні зображення мають значні переваги над іншими знімками щодо дешифрування гідрографічних мереж (чітко виокремлюються берегові лінії, теплові неоднорідності водної поверхні тощо), також під час вивчення дна шельфу.

– *Радіотеплові* знімання виконуються в міліметровому діапазоні радіохвиль мікрохвильовими радіометрами (відносяться до пасивних знімальних систем), які фіксують радіотеплове випромінювання землі. Перевагами цього виду знімання є можливість отримання зображення навіть через хмари, снігове, льодовикове покриття, вдень і вночі. Недоліком цього виду знімання є отримання зображень з порівняно низьким просторовим розрізненням: сотні й десятки метрів за авіаційного знімання та кілометри в разі космічного знімання. Зображення отримується в результаті лінійного проектування та конічної згортки. Результати радіотеплових знімачів використовують для дослідження стану забруднення вод, геологічного картографування, дослідження стану морів і океанів, в навігації, стану снігового покриву та інших галузях науки і економіки. Також радіотеплові зображення можуть бути корисними під час розпізнавання об'єктів з низькими температурами.

– *Лазерне сканування* відносяться до активних методів зондування та виконуються лазерними знімальними системами, які

встановлюють на борту літака, аероплану, гелікоптеру, безпілотних літальних апаратів, у видимому та близькому інфрачервоному діапазоні. Зображення земної поверхні одержують у вигляді хмари точок земної поверхні за рахунок відбитого випромінювання від поверхні землі. Методика відзначається високою продуктивністю та ґрунтується на лазерному вимірюванні від відстані до приладу до точки на місцевості, координати якої визначаються у вибраній системі координат. Лазерне сканування застосовують з метою побудови цифрових моделей рельєфу навіть для важкодоступних та недоступних територій, за наявної рослинності та несприятливих погодних умов, створення ортофотозображень та мозаїк, картографування територій та в завданнях оцінювання явищ та процесів, спричинених надзвичайними ситуаціями природного і техногенного характеру. До переваг методу відносять: незалежність від погоди і освітленості, висока продуктивність у разі менших фінансових витрат в порівнянні з іншими методами, такими як традиційний фотограмметричний.

– *Радіолокаційні* знімання виконуються в сантиметровому або метровому діапазоні радіохвиль за допомогою радіолокаційних систем бічного огляду та радіолокаційних систем з синтезованою апертурою (відносяться до активних знімальних систем). Зазначені системи є сканувальними пристроями, в яких сканування відбувається по один бік від носія перпендикулярно до лінії польоту, тому щоб зняти дві смуги відносно траєкторії польоту необхідно встановити дві антени. Перевагами знімання є можливість отримання зображень в умовах, коли об'єкти закриті хмарами, туманом, димовими завісами тощо в будь-який час доби. Зображення отримується в результаті тангенціальної розгортки. Застосовують в завданнях екологічного моніторингу, визначення деформацій земної поверхні та для побудови цифрових моделей рельєфу [12].

За типом сенсора аерокосмічні методи поділяються на активні і пасивні. Під час активного зондування використовується вимушене випромінювання об'єктів, ініційоване штучним джерелом спрямованої дії; під час пасивного використовується власне, природне відбите або вторинне випромінювання об'єктів на поверхні Землі, обумовлене сонячною активністю [12].

– *До пасивних* відносять: аерофотознімання, гіперспектральні та мультиспектральні знімання, знімання з безпілотних літальних

апаратів. При чому БПЛА впевнено завойовують популярність серед виробників геопросторових даних завдяки відносно недорогій вартості знімального обладнання та великої швидкості отримання і опрацювання даних на території інтересу для створення: ортофотопланів, 3-D моделей місцевості і рельєфу, крупномасштабних топографічних планів тощо.

- **До активних** відносять лазерне сканування (LIDAR) та радіолокаційне знімання (Radar), яке в свою чергу поділяється на: радіолокаційне знімання за допомогою системи бічного огляду з реальною антеною (Side Looking Airborne radar – SLAR), радіолокаційне знімання за допомогою системи із синтезованою апертурою антени (Synthetic-aperture radar – SAR), інтерферометрію (InSAR).

- Радіолокаційне знімання за допомогою системи бічного огляду з реальною антеною (РБО) використовувалося для геологічних, геоморфологічних досліджень та для картографування тих регіонів, які завжди закриті хмарами. Ці знімання з часом замінили радіолокаційні знімання за допомогою системи із синтезованою апертурою антени (РСА). РСА формують зображення, зондуючи поверхню когерентними надвисокочастотними радіосигналами та приймаючи відбите випромінювання послідовно, за траєкторією польоту носія.

- Спосіб побудови зображення дає можливість істотно збільшити просторове розрізнення зображень до метрів на земній поверхні.

- Метод інтерферометрії ґрунтується на використанні пари радіолокаційних зображень і заснований на різниці фаз двох чи більше відбитих від поверхні землі когерентних радіолокаційних сигналів з метою отримання точної інформації про рельєф та невеликі зсуви об'єктів місцевості.

- Інтерферометрія поділяється на: однопрохідну інтерферометрію, двопрохідну, диференціальну, які відрізняються лише технологією сканування для отримання пари радіолокаційних зображень. Дані отримані в результаті такого знімання відносяться до класу середньої розрізненості і не використовують для

топографічного картографування, проте в 2000-х роках в результаті виконання топографічного проекту Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) було отримано цифрову модель рельєфу Землі з точністю 30 м.

- Методика диференціальної інтерферометрії показує

дивовижну перевагу в моніторингу землетрусів, вулканів, зсувів та інших поверхневих деформацій, але для моніторингу повільної деформації поверхні, наприклад, осідання поверхні міста, вона зазнає впливу часової декореляції, космічної декореляції і атмосферної затримки. Тому для вирішення цієї проблеми в 1999 році з'явилися PSI методи, першим з них був метод інтерферометрії стійких відбивачів (Permanent Scatterer SAR Interferometry – PSInSAR), обґрунтований і запатентований Міланським технічним університетом. Цей інноваційний метод є похідним від методу диференціальної інтерферометрії. Методика PSInSAR – це методика часових рядів для якої додається кількість часу для кожної радарної цілі. Метод PSInSAR використовує багато зображень SAR, мінімум 20-25 знімків, що охоплюють одну і ту ж територію, атмосферні та орбітальні помилки по-суті усунені. Чим більша кількість зображень, тим надійніші результати. Одне із зображень вибирається як основне зображення, інші стають підпорядкованими зображеннями для уточнення інформації на основному зображенні і виправлення помилок. Тоді на прийнятій вибраній моделі вибирають достатню кількість точок, так званих, стійких відбивачів (point-wise permanent scatterers – PS це переважно штучні споруди, будівлі, металеві предмети, пілони, антени, відкриті гірські породи), які мають високу відбивну здатність і використовуються в ролі стійких відбивачів радарного сигналу. Результатом проведення аналізу фаз точок стають деформації PS точок. У кінці використовується метод інтерполяції для визначення деформації всієї досліджуваної території. В даний час, методика PSInSAR широко застосовується лише для моніторингу осідання поверхні в містах, оскільки отримують деформації поверхні з точністю до міліметрів [12].

Для виявлення деформацій земної поверхні незабудованих територій було винайдено метод SqueeSAR, який є вдосконаленим методом PSInSAR. В аналізі приймають участь як PS точки, які відповідають техногенним об'єктам, так і точки розподілених відбивачів (distributed scatterers – DS), які відповідають однорідним поверхням, селевим потокам, необробленим землям, пустельним районам тощо. Цей новий підхід забезпечує додаткові дані в умовах низького відбивання в однорідних областях. Деформація поверхні методом SqueeSAR визначається з точністю до міліметрів. Недоліком цього методу є те, що супутникові сигнали не повертаються ділянками зі значним рослинним

покривом, отже, немає даних деформацій земної поверхні [12].

Огляд наземних, дистанційних методів збирання геопросторових даних показує, що чинна нормативна документація в топографо-геодезичній та картографічній галузі ідеологічно та технологічно виявляється застарілою. Рівень розвитку і застосування сучасних технологій збирання геопросторових даних значно випереджає нормативну базу щодо них в Україні.

Слід зазначити, що опубліковані два проекти Порядку топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500:

- <https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2021/12/проект.pdf>
- <https://land.gov.ua/proekt-nakazu-ministerstva-agrarnoyi-polityky-ta-prodovolstva-ukrayiny-pro-zatverdzhennya-poryadku-topografichnoyi-zjomky-u-masshtabah-15000-12000-11000-ta-1500/>

Зважаючи на сучасне різноманіття зазначених вище методів збирання геопросторових даних, постає питання дослідження технологічних схем, точності, достовірності та оперативності знімань для перегляду нормативно-технічної документації забезпечення топографічного картографування, продукція якого б відповідала сучасним досягненням розвитку геоінформаційних технологій, вимогам і потребам інформаційного суспільства.

Контрольні запитання

1. Назвіть сучасні наземні методи топографічних знімань.
2. Назвіть сучасні дистанційні методи топографічних знімань.
3. Чим відрізняються дистанційні методи за способом одержання даних?
4. Чим характеризується сучасна класифікація методів збирання геопросторових даних?
5. Які методи є ефективними для великомасштабного топографічного картографування?

Лекція 4. Електромагнітні коливання і хвилі.

Методи вимірювання віддалей

Коливання — це рухи або стани, що характеризуються тим чи іншим ступенем повторюваності у часі. У техніці коливання або виконують певні функції, або виникають як неминучий прояв фізичних властивостей. У фізиці виділяють коливання двох типів: механічні та електромагнітні.

Серед коливальних процесів слід виділити періодичні коливання, для яких виконується рівність:

$$S(t) = S(t + NT), \quad (2.1)$$

де $S(t)$ — величина, що коливається, t — час, N — будь-яке ціле число, T — деякий якнайменший кінцевий проміжок часу, через який повторюються значення всіх фізичних величин, що характеризують коливальний рух. Цей проміжок часу називається періодом коливання. Зворотна величина до періоду коливання виражає число коливань в одиницю часу і називається *частотою*:

$$f = 1/T. \quad (2.2)$$

Частота вимірюється у *герцах*. 1 герц (Гц) — це одне коливання в секунду. Вживаються також наступні одиниці частоти: кілогерц (кГц) — 10^3 Гц; мегагерц (МГц) — 10^6 Гц; гігагерц (ГГц) — 10^9 Гц; терагерц (ТГц) — 10^{12} Гц.

Найважливішим у практичному плані видом періодичних коливань є *гармонійні* (синусоїдальні) коливання, які описуються рівнянням:

$$S(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2.3)$$

або

$$S(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (2.4)$$

Косинусоїда — це синусоїда зміщена на чверть періоду. Величина A називається амплітудою коливання (найбільше значення, яке приймає величина $S(t)$ під час коливань), $\omega = 2\pi f$ — кутовою або циклічною частотою, φ_0 — початковою фазою коливань. Аргумент синуса або косинуса $\varphi = \omega t + \varphi_0$ називають поточною фазою, миттєвою фазою або

просто фазою коливання. Початкова фаза – це фаза коливання у момент $t = 0$ (рис. 2.1).

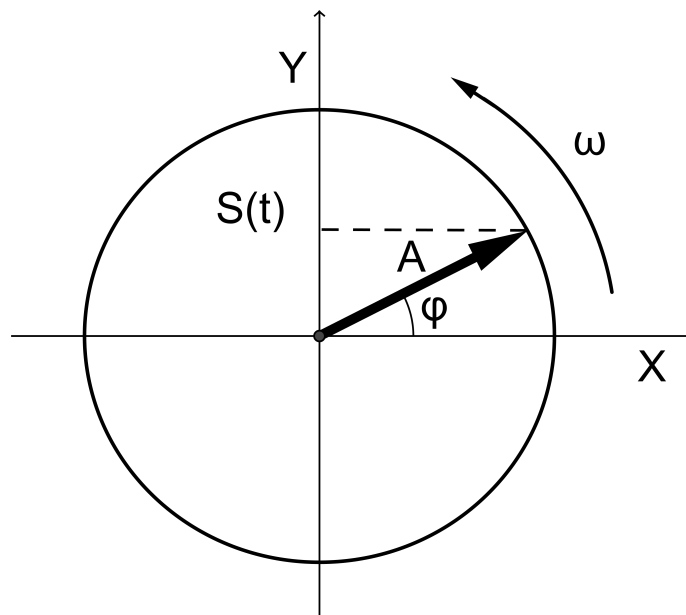


Рис. 2.1. Подання гармонійного коливання вектором, що обертається

Рівняння гармонійного коливання можна записати у вигляді $S(t) = A \sin \varphi$, що дасть йому наочну геометричну інтерпретацію, представивши коливальний процес у вигляді вектора, що обертається. Довжина (модуль) вектора — це амплітуда A , кут між вектором і віссю x — фаза φ , а кутова швидкість обертання (проти годинникової стрілки) — кутова частота ω . Фаза — це кутова величина (вимірюється в градусах або радіанах). Якщо обертання вектора величиною $S(t)$, то здійснює коливання, є проекція вектора на вісь Y . Її значення змінюється в інтервалі від $+A$ до $-A$. Можна наочно переконатися, що це коливання синусоїдальне. Проекція кінця вектора на вісь Y дає точку, що неперервно рухається “вверх-вниз” по осі Y . Уявимо собі, що до цієї точки прикріплений який-небудь пишучий пристрій (скажімо, олівець або перо з чорнилом), а перед ним протягується паперова стрічка з постійною швидкістю. Тоді на стрічці викреслюватиметься синусоїда — розгортка коливання в часі.

Під час суперпозиції (складання) двох гармонійних коливань однакової частоти результатне коливання буде гармонійним і з тією ж частотою. Його амплітуда і початкова фаза залежать від співвідношення амплітуд і початкових фаз коливань, що складаються.

Під час суперпозиції двох гармонійних коливань з різними частотами результатне коливання вже не буде гармонійним. Якщо частоти близькі, то результатний коливальний процес називається *биттям*. Амплітуда і фаза результатного коливання періодично міняються у часі з частотою, що дорівнює різниці частот початкових коливань, які називаються *частотою биття*.

Наприклад, під час одночасного збудження двох струн, одна з яких видає звук з частотою 440 Гц, а інша, трохи меншої довжини, — з частотою 444 Гц (причому амплітуда цих звукових коливань, тобто їх гучність, буде однаковою), то ми почуємо звук з середньою частотою 442 Гц, але його гучність періодично змінюватиметься, стаючи то більше, то менше гучності початкових звуків, і ця зміна відбуватиметься з частотою 4 Гц.

Будь-яке негармонійне (складне), але періодичне коливання з періодом T можна представити у вигляді суми простих гармонійних коливань з частотами, кратними частоті $f = 1/T$ складного коливання (ряд Фур'є). Сукупність складових гармонійних коливань називають *спектром* складного коливання, а самі складові — *гармоніками*. Гармоніки з частотами відповідно $f, 2f, 3f$ і т.д. називаються відповідно першою (основною), другою, третьою і т.д. гармоніками. Різні гармоніки мають різну амплітуду і фазу. Чим вище номер гармоніки, тим зазвичай менше її амплітуда.

Таким чином, будь-яке періодичне коливання має дискретний спектр, що складається з гармонік. Якщо ж коливання неперіодичне, то воно представляється не рядом, а інтегралом Фур'є і має суцільний (неперервний) спектр, що складається з нескінченного числа синусоїд з неперервною послідовністю частот [1].

Коливання, що розповсюджуються у просторі або деякому середовищі, називаються *хвилями*. Вони характеризуються довжиною хвилі λ , пов'язаною з частотою коливань f співвідношенням $\lambda = v / f$, де v — швидкість поширення коливань.

Електромагнітні коливання (ЕМК) — це взаємозв'язані коливання електричного і магнітного полів, які складають електромагнітне поле. Розповсюдження ЕМК відбувається у вигляді електромагнітних хвиль. ЕК є дискретною сукупністю фотонів, і тільки під час наявності дуже великого числа фотонів електромагнітні

коливання можна розглядати як неперервний процес. Розрізняють вимушені ЕМК, які підтримуються зовнішніми джерелами, і власні коливання, що існують без них [6].

Електромагнітні хвилі (ЕМХ) — це сукупність електричного та магнітного полів, напруженості яких змінюються з часом за періодичним законом і які поширюються в просторі з *конечною швидкістю* окремо від зарядів. Електромагнітні хвилі поперечними: вектори E і H напруженості електричного і магнітного полів взаємно перпендикулярні і лежать в площині, перпендикулярній вектору швидкості розповсюдження хвилі.

Існування ЕМХ було передбачено М. Фарадеєм в 1832 році. Дж. Максвел в 1865 році теоретично показав, що ЕМК розповсюджуються у вакуумі зі швидкістю світла. У 1888 році теорія ЕМХ Максвела підтвердилася дослідженням Г. Герца, що зіграло вирішальну роль для її утвердження.

Теорія Максвела дала змогу встановити, що радіохвилі, світло, рентгенівське випромінювання і гамма-випромінювання є ЕМХ з різною довжиною хвилі λ , причому між сусідніми діапазонами шкали ЕХ немає чітких меж [6].

Особливості ЕМХ, закони їх збудження та розповсюдження описуються рівняннями Максвела. На характер розповсюдження хвиль значно впливає середовище, в якому вони розповсюджуються. Так хвилі заломлюються під час переходу з одного середовища в інше, в реальних середовищах має місце дисперсія хвиль, поблизу неоднорідних середовищ — дифракція хвиль, інтерференція, повне відбивання та інші явища, які характерні хвилям будь-якої природи.

Електромагнітні хвилі розділяють по довжинах хвиль на ряд діапазонів, сукупність яких утворює спектр електромагнітних хвиль. Більшу частину цього спектру займають радіохвилі, довжина яких може складати від 0,1мм до понад 100км. Невеликою, але дуже важливою ділянкою спектру є оптичний діапазон хвиль. Він ділиться на три області. Центральна з них — видима область спектру (видиме світло), що займає інтервал приблизно від 0,4 мкм (фіолетове світло) до 0,75 мкм (червоне світло). Зліва від неї (у бік зменшення довжини хвиль) знаходиться ультрафіолетова (УФ) область, а справа (у бік збільшення довжин хвиль) — інфрачервона (ІЧ) область. Ультрафіолетова та інфрачервона області оптичного діапазону спектру невидимі оком [7].

Електромагнітні хвилі мають властивість *поляризації*. Якщо коливання вектора E (напруженості електричного поля) в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження хвилі, відбувається в різних, змінюваних випадковим чином напрямках в цій площині, хвиля називається *неполяризованою*. Якщо ж коливання вектора E відбуваються тільки в одному напрямі у вказаній площині, то хвиля називається *лінійно-поляризованою*. Перетворити неполяризовану хвилю в лінійно поляризовану можна за допомогою спеціальних пристроїв — поляризаторів, які пропусають коливання лише одного напрямку.

Рівняння лінійно-поляризованої монохроматичної (тобто викликаної коливанням строго однієї частоти) хвилі, що розповсюджується вздовж осі X зі швидкістю v , має вигляд:

$$S(t, x) = A \cos[\omega(t - x/v) + \varphi_0] = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0), \quad (2.5)$$

де $k = \omega/v = 2\pi/\lambda$ — хвильове число.

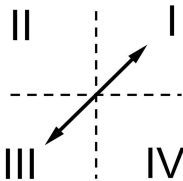
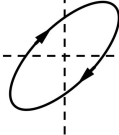
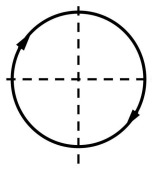
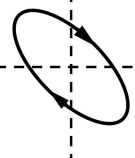
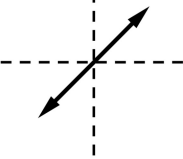
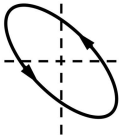
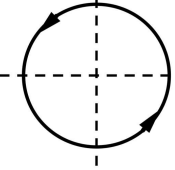
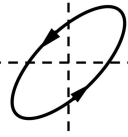
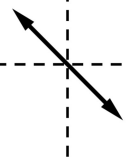
Хвилі однакової частоти, що постійно зберігають різницю фаз, називаються *когерентними*. Під час складання двох когерентних монохроматичних хвиль, лінійно поляризованих в одній площині, амплітуда сумарної хвилі залежатиме від різниці фаз хвиль, що складаються. Така взаємодія хвиль називається *інтерференцією*. Результатна хвиля лінійно поляризована в тій же площині, що і хвилі, які складаються.

Під час складання двох когерентних монохроматичних хвиль, лінійно поляризованих у взаємно перпендикулярних площинах, інтерференції не відбувається. В загальному випадку (тобто під час різних амплітуд хвиль і довільному зсуві фаз між ними) проекція кінця електричного вектора на площину, перпендикулярну напрямку розповсюдження, описує еліпс. Така хвиля називається *еліптично-поляризованою*. Якщо амплітуди хвиль, що складаються, рівні, то вид еліпса залежить тільки від різниці фаз φ цих хвиль. Це ілюструється у таблиці 2.1.

З таблиці видно, що для різниці фаз 90° і 270° еліпс перетворюється на коло і хвиля називається поляризованою по колу або *циклічно-поляризованою*. Для різниці фаз 0° або 180° еліпс вироджується у пряму лінію і хвиля буде *лінійно-поляризованою*. Таким чином, лінійна і циклічна поляризація є окремими випадками еліптичної поляризації [8, 10, 11].

Таблиця 2.1

Поляризація в залежності від різниць фаз

ϕ°	0		45	90	135
Поляризація					
	180	225	270	335	360
					

Перетворення гармонійних коливань.

Модуляція — це зміна параметрів коливання в часі за певним законом. Відповідно до того, який параметр модулюється (A , ω або ϕ_0), розрізняють амплітудну (АМ), частотну (ЧМ) і фазову модуляції (ФМ). У світловіддалемірах іноді використовують ще один вид модуляції — поляризаційну (ПМ), для якої змінюється стан поляризації світлових коливань. Коливання, параметр якого модулюється, називається *несучим коливанням*, а його частота $f = \omega / 2\pi$ — *несучою частотою*.

Модуляція полягає в тому, що на вибраний параметр діє *модулююче коливання*, яке задає закон зміни параметра. У найпростішому випадку модуляція здійснюється за гармонійним законом. Модульований параметр P подається у вигляді:

$$P(t) = P_0 + \Delta P \cos \Omega t = P_0 (1 + m \cos \Omega t), \quad (2.6)$$

де P_0 — відповідний параметр не модульованого коливання, ΔP — амплітуда зміни параметра, $\Omega = 2\pi F$ — циклічна частота модуляції (F — частота модуляції, тобто частота модулюючого коливання). Величину $m = \Delta P / P_0$ називають коефіцієнтом модуляції. Частота модуляції завжди набагато менше несучої частоти, тобто $F \ll f$ (відповідно $\Omega \ll \omega$) (рис. 2.2).

Рис. 2.2. Діапазони електромагнітного спектру [8, 10, 11]

У наземних віддалемірних пристроях найчастіше застосовується амплітудна модуляція за гармонійним законом (рис. 2.4). Розглянемо цей випадок докладніше.

Нехай не модульоване (несуче) коливання має вигляд (2.4), в якому для простоти візьмемо початкову фазу $\varphi_0 = 0$:

$$S = A_0 \cos \omega t. \quad (2.7)$$

Для гармонійної АМ амплітуди, у відповідності з (2.1), зміна у часі за законом:

$$A(t) = A_0 + \Delta A \cos \Omega t = A_0 (1 + m \cos \Omega t) \quad (2.8)$$

і рівняння АМ-коливання буде:

$$S_{AM} = A_0 (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t. \quad (2.9)$$

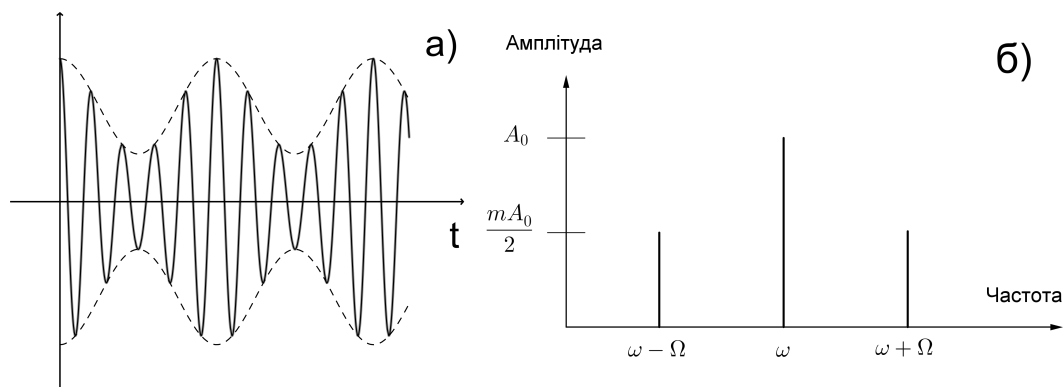


Рис. 2.3. АМ-коливання, в якому амплітуда змінюється за гармонійним законом (а); частотний спектр АМ-коливання (б)

Це рівняння також можна представити у вигляді:

$$S_{AM} = A_0 \cos \omega t + (mA_0 / 2) \cos(\omega - \Omega)t + (mA_0 / 2) \cos(\omega + \Omega)t. \quad (2.10)$$

Формула (2.4) показує, що АМ-коливання – це коливання однієї частоти ω (несучої), але із змінною амплітудою $A_0(1 + m \cos \Omega t)$, величина якої змінюється в часі з частотою модуляції Ω . В свою чергу, формула (2.5) говорить про те, що АМ-коливання складається з трьох гармонійних складових з частотами ω , $\omega - \Omega$ і $\omega + \Omega$ і постійними

амплітудами (A_0 , $m A_0 / 2$ і $m A_0 / 2$ відповідно). Питання "чим же є АМ-коливання насправді?" некоректне: обидва представлення еквівалентні. В одних випадках доцільно використовувати запис (2.7), в інших – (2.5). Вираз (2.5) показує частотний спектр АМ-коливання (рис.2.3,б). Частоти $\omega - \Omega$ і $\omega + \Omega$ називаються *боковими частотами*. Таким чином, амплітудно-модульоване коливання в загальному випадку складається з несучої частоти і двох бокових частот.

Окремим цікавим випадком є *биття*, про яке згадувалося вище – результат складання двох близьких частот ω_1 і ω_2 . Биття – це теж АМ-коливання, але його спектр складається з цих двох частот.

Окрім гармонійної модуляції, часто використовується модуляція по прямокутному закону, коли значення модульованого параметра стрибкоподібно міняється від P_1 до P_2 і через деякий час – назад, і цей процес повторюється через однакові або різні інтервали часу. Модуляцію за прямокутним законом називають *маніпуляцією*. Маніпуляція фази використовується, наприклад, в глобальних супутникових навігаційних системах.

Демодуляція – процес, зворотний модуляції, тобто виділення модулюючого сигналу із складного модульованого коливання. Існують детектори АМ-, ЧМ- і ФМ-коливань. Зазвичай ЧМ- і ФМ коливання перетворюють у АМ-коливання, які найпростіше. Детектування АМ-коливання є нелінійною операцією, в процесі якої відбувається перемножування цього коливання або на несуче коливання, або самого на себе. Перший варіант називають синхронним детектуванням, другий – квадратичним детектуванням. В обох випадках у результаті перемножування виходить сума доданків (спектр), один з яких буде коливанням модулюючої частоти, яке виділяють за допомогою відповідного фільтру, який пропускає лише дану частоту.

Гетеродинування (змішування) – це операція перетворення частоти коливання з метою отримання коливання іншої частоти. Дана операція частіше всього використовується для пониження частоти. Для здійснення гетеродинування початкове коливання частоти f змішується у радіотехнічному змішувачі з коливанням, частота якого відрізняється від f на невелику величину Δf . Це коливання одержують від *гетеродина* – допоміжного генератора. Під змішуванням звичайно розуміється перемножування коливань. У результаті перемножування утворюється

спектр частот, що містить, зокрема, коливання різницевої частоти Δf , яке можна виділити за допомогою відповідного фільтру. Таким чином, коливання високої частоти f перетворюється на коливання низької частоти Δf . Фаза низькочастотного коливання дорівнює різниці фаз коливань, що змішуються.

Гетеродинування широко використовується у геодезичних фазових віддалемірах, в яких виникає задача вимірювання різниці фаз двох високочастотних сигналів. Нехай є два коливання однакової високої частоти f :

$$S_1 = A_1 \cos(2\pi f t + \varphi_1), \quad (2.6)$$

$$S_2 = A_2 \cos(2\pi f t + \varphi_2), \quad (2.7)$$

різницю фаз яких:

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2.8)$$

необхідно виміряти. Змішавши кожне з цих коливань з коливаннями гетеродина частоти f_r :

$$S_r = B \cos(2\pi f_r t + \varphi_r) \quad (2.9)$$

у змішувачах $Зм1$ і $Зм2$ (рис. 2.4) і направивши вихідні сигнали змішувачів в підсилювачі низької частоти 1 і 2, отримаємо на виходах підсилювачів коливання різницевої частоти $|f - f_r| = \Delta f$ вигляду:

$$S_1 = C_1 \cos[2\pi \Delta f t + (\varphi_1 - \varphi_r)] \quad (2.10)$$

$$S_2 = C_2 \cos[2\pi \Delta f t + (\varphi_2 - \varphi_r)]. \quad (2.11)$$

Різниця фаз цих коливань:

$$(\varphi_2 - \varphi_r) - (\varphi_1 - \varphi_r) = \varphi_2 - \varphi_1 = \varphi, \quad (2.12)$$

тобто різниця фаз коливань низької (різницевої) частоти Δf дорівнює різниці фаз початкових коливань високої частоти f , або, іншими словами, під час гетеродинування фазові співвідношення не змінюються. Цей вельми важливий висновок говорить про те, що вимірювання різниці фаз двох коливань високої частоти можна, застосувавши гетеродинування, замінити вимірюванням різниці фаз двох низькочастотних коливань, що виконується простіше і точніше технічно.

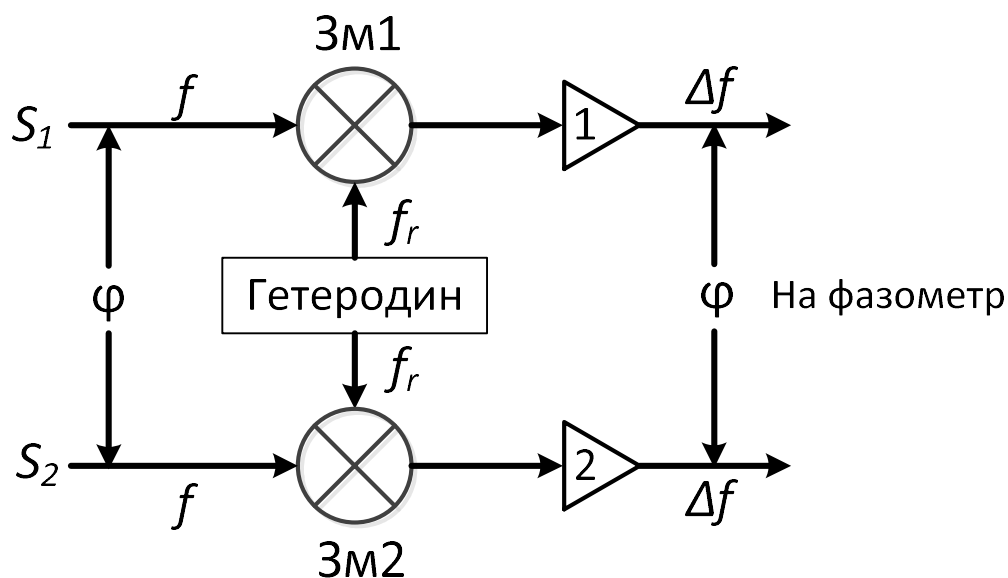


Рис. 2.4. Гетеродинна схема вимірювання різниці фаз

Кореляційне оброблення негармонійних сигналів. Поняття "кореляційне оброблення" застосовується до широкосмугових сигналів, тобто до сигналів з широким спектром. Метою кореляційного оброблення є вимірювання часу затримки між двома однаковими, але зсунутими за часом широкосмуговими сигналами. Якщо є два сигнали $S_1(t)$ і $S_2(t + \tau)$, де τ — часова затримка другого сигналу щодо першого, то вводиться поняття кореляційної функції цих сигналів $K_{1,2}$, формула якої має вигляд:

$$K_{1,2} = \langle S_1(t) \cdot S_2(t + \tau) \rangle, \quad (2.13)$$

де кутові дужки означають середнє за великий проміжок часу — таке, яке більше періоду найбільш низькочастотної складової спектру сигналів S_1 і S_2 . Значення кореляційної функції отримують на виході *корелятора* — пристрою, що реалізовує операцію (2.13) множення і усереднення під час подачі сигналів S_1 і S_2 на його входи. Кореляційна функція $K_{1,2}$ має один різко виражений максимум для $\tau = 0$. Отже, якщо примусово змінювати затримку τ до отримання максимуму вихідного сигналу корелятора і виміряти необхідну величину зміни, ми тим самим визначимо цю затримку. По суті, це компенсаційний спосіб, в якому індикатором моменту компенсації затримки служить максимум кореляційної функції. Перевагою кореляційного методу є малий вплив шумів, що супроводжують сигнали S_1 і S_2 , на результат вимірювань.

Кореляційне оброблення сигналів використовується в радіоінтерферометрії з наддовгою базою (РНДБ) і під час так званих кодових вимірюваннях у глобальних супутникових системах [8, 10, 11].

Лазери. Ефект Доплера. Лазер (від англ. *LASER* – *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, підсилення світла за допомогою вимушеного випромінювання) – це джерело оптичного випромінювання з високим ступенем когерентності. У загальному значенні термін "когерентність" означає "узгодженість". Світло називається когерентним, якщо всі атоми речовини випромінюють світлові хвилі, що мають строго однакову амплітуду, частоту, фазу, поляризацію і напрям розповсюдження. Такого ідеально когерентного джерела не існує, але лазер є найкращим до нього наближенням.

Будь-який лазер складається з трьох основних елементів (рис. 2.5): активного середовища (серце лазера: тверде, рідке або газоподібне), системи накачки (джерела енергії) і оптичного резонатора (системи дзеркал), утворюваного двома паралельними дзеркалами, між якими розміщується активне середовище. Одне з дзеркал робиться частково прозорим для виходу випромінювання лазера.

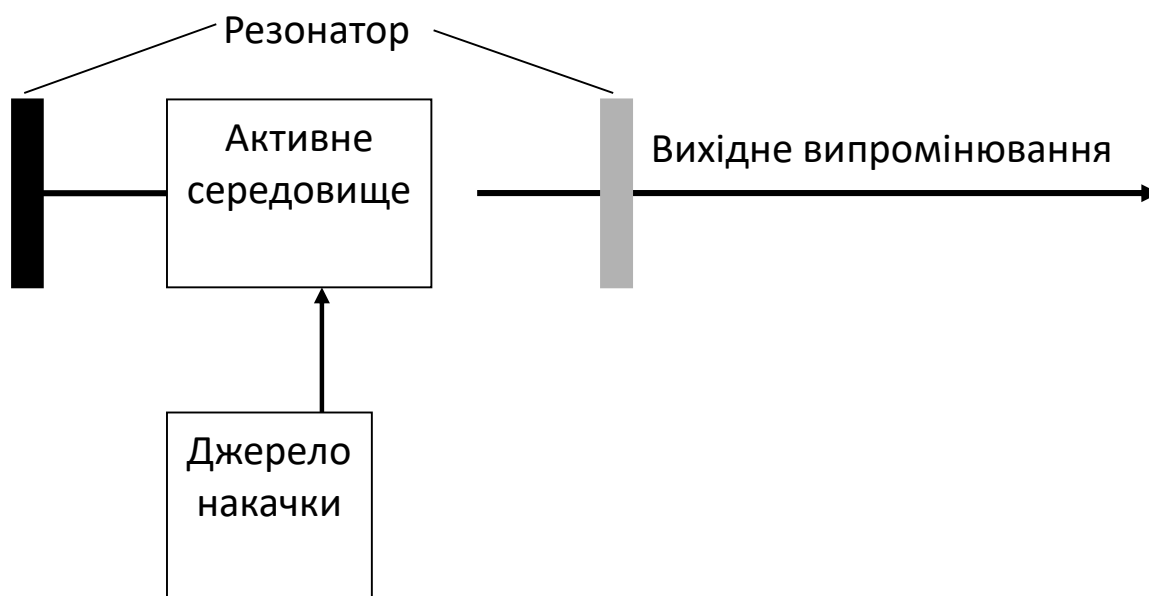


Рис. 2.5. Принципова схема лазера

Принцип роботи лазера зводиться до наступного. Активне середовище, одержуючи енергію від джерела накачки, переходить у так званий стан з інверсною населеністю енергетичних рівнів — збуджений стан, для якого число атомів речовини, "перекинутих" на більш високий енергетичний рівень, стає більше числа атомів, що залишилися на

нижньому (основному) енергетичному рівні. Цей стан є нестійким: будь-який з атомів, що опинилися на верхньому рівні, може самостійно перейти назад на основний рівень, випускаючи квант світла (фотон) певної частоти, що залежить від різниці енергій рівнів. Так і відбувається, причому моменти народження різних фотонів, ініційованих переходами тих або інших атомів, випадкові, не згаджені один з одним, фотони розлітаються в різних напрямках, спрямовуючись "хто куди". Таке випромінювання називається *спонтанним* (мимовільним), і воно некогерентне.

І ось тут вступає в гру оптичний резонатор. Спонтанні фотони, що утворились у напрямі осі резонатора, пройдуть уздовж нього порівняно великий шлях, багато разів циркулюючи між відбиваючими дзеркалами. Виникає дуже важлива обставина. Вона полягає у тому, що циркулюючі фотони, взаємодіючи на своєму шляху з атомами, що нагромадилися на верхньому енергетичному рівні, ініціюють їх перехід на нижній рівень з випуском фотонів. Оскільки ці переходи виникають не випадково, а вимушено, під дією циркулюючих уздовж осі резонатора фотонів, то фотони, що народжуються під час цих переходів будуть точною копією того фотона, що "примушує", — вони матимуть ту ж енергію, той же напрям руху та інші абсолютно ідентичні характеристики. Виникає інтенсивний потік згаданих фотонів. Таке випромінювання називається (на відміну від спонтанного) *вимушеним* (а також *стимульованим* або *індукованим*) і є, як легко зрозуміти, когерентним. Та обставина, що в лазері має місце стимульоване випромінювання, відображено в абревіатурі LASER. У слові LASER, правда, мовиться про посилення світла, тоді як лазер — генератор світла, однак це не має принципового значення, оскільки будь-який підсилювач можна, як відомо, перетворити на генератор введенням ланцюга зворотного зв'язку з виходу на вхід підсилювача. Таким ланцюгом і є дзеркала резонатора (підсилювачем служить збуджене активне середовище). Після кожного подвійного проходу довжини резонатора частина випромінювання виходить з лазера через напівпрозоре дзеркало.

Лазер може генерувати не будь-які довжини хвиль λ , а тільки такі, які укладаються ціле число раз q на подвійній довжині резонатора $2L$, тобто задовольняють умові резонансу:

$$2L = q\lambda. \quad (2.14)$$

Ці резонансні довжини хвиль називаються *поздовжніми модами*, і якщо в смугу посилення активного середовища потрапляє багато таких довжин хвиль, то вони генеруються одночасно, тобто в спектрі випромінювання лазера може міститися багато поздовжніх мод, віддалених одна від одної по частоті на однаковий інтервал $\Delta\nu = c_p / 2L$, де c_p – швидкість світла в резонаторі. Такі лазери називаються багатомодовими. Спеціальними методами селекції можна виділити тільки одну моду, і тоді лазер називають одномодовим або одночастотним.

Лазерне випромінювання характеризується наступними властивостями, що відрізняють його від випромінювання всіх інших джерел:

- високим ступенем просторової і часової когерентності;
- (як наслідок) високим ступенем монохроматичності, тобто зосереджене у дуже вузькому спектральному інтервалі (ідеально монохроматичного джерела не існує, але лазер є найближчим до нього);
- надзвичайною вузьконаправленістю (малою шириною пучка);
- високою спектральною густиною потужності (густина потужності – це потужність, що припадає на одиницю площі, наприклад, на 1 см²; спектральна густина потужності — густина потужності, віднесена до одиничного спектрального інтервалу, наприклад, до 1 мкм).

Залежно від виду активного середовища розрізняють твердотільні, рідинні (на розчинах органічних фарбників), газові та напівпровідникові лазери.

Твердотільні лазери. До них відносяться лазери на рубіні, неодимовому склі і натрій-алюмінієвому гранаті. Вони працюють в імпульсному режимі, випромінюючи короткі оптичні імпульси великої потужності (лазер на гранаті може працювати і в безперервному режимі). З них в геодезії на даний час використовуються потужні пікосекундні імпульсні лазери на гранаті з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм – у лазерних віддалемірах для вимірювання відстаней до ШСЗ часовим методом, про що вже згадувалося вище. Останнім часом освоюється застосування лазерів на титан-сапфірі, від яких можна одержувати імпульси фемтосекундного діапазону ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) тривалістю в сотні і десятки фемтосекунд.

Газові лазери генерують неперервне випромінювання. Окрім вже згаданого гелій-неонового (He-Ne) лазера, що використовується в наземних світловіддалемірах і випромінюючого червоне світло з

довжиною хвилі 0,63 мкм, у двоххвильових світловіддалемірах можуть використовуватися гелій-кадмієвий (He-Cd) лазер з довжиною хвилі 0,44 мкм (синє світло) і аргонний (Ar) лазер, що може одночасно генерувати випромінювання на двох довжинах хвиль: 0,46 мкм (синє світло) та 0,51 мкм (зелене світло). Газові лазери мають найбільший ступінь монохроматичності випромінювання.

Лазери на барвниках володіють чудовою властивістю – можливістю перебудови довжини хвилі в широкому діапазоні, але геодезичного застосування вони поки що не отримали.

Напівпровідникові лазери представляють собою особливий клас лазерів; зважаючи на їх вельми специфічні властивості, вони широко використовуються в сучасних наземних світловіддалемірах і електронних тахеометрах. Однією з найпривабливіших їх якостей є дуже малі розміри (менше 1 см) і маса. Напівпровідниковий лазер на арсеніді галію, що частіше всього використовується у віддалемірній техніці, є лазерним діодом, виконаним у вигляді кристала, складеного з двох "половинок" з різними типами провідності: електронною (n-провідність) і дірчастою (p-провідність). Між ними утворюється зона, що називається p-n-переходом. Якщо на ці "половинки" подати постійну напругу живлення (підключивши позитивний полюс до p-області), то в зоні p-n-переходу утворюються фотони і звідти виходить випромінювання. Так отримується світлодіод, але його випромінювання некогерентне. Щоб перетворити світлодіод на лазерний діод, треба відполірувати торцеві грані кристала, які слугуватимуть дзеркалами резонатора, і збільшать густину струму через діод. Тоді випромінювання стає когерентним – ми отримуємо напівпровідниковий лазер.

Окрім малих габаритів, такий лазер володіє ще однією цінною властивістю – можливістю внутрішньої модуляції випромінювання. Тобто якщо в віддалемірі джерелом випромінювання служить напівпровідниковий лазер, то модулятора, як окремого пристрою, не треба – достатньо подати напругу живлення на лазерний діод, як змінну модулюючу напругу від генератора і випромінювання, що виходить з діода, буде модульованим. Можлива модуляція з дуже високою частотою — до 1 ГГц.

Ефект Доплера. Цей ефект полягає в тому, що під час наближення або віддалення випромінювача (передавача) і приймача частота коливань, що приймається, відрізнятиметься від частоти випромінюваних коливань. Байдуже, що саме рухається —

випромінювач або приймач; важливий їх відносний рух, тобто зміна відстані між ними. (Це справедливо у разі нехтування релятивістськими, тобто пов'язаними з теорією відносності, ефектами, якими у всіх що цікавлять нас випадках можна нехтувати через малу швидкість руху в порівнянні зі швидкістю світла). Якщо, скажімо, випромінювач віддаляється від нерухомого приймача, то останній прийматиме в одиницю часу менше хвиль в порівнянні з випадком незмінної відстані між випромінювачем і приймачем. Тобто довжини хвиль збільшуються, а частота відповідно зменшується. У разі наближення випромінювача до приймача картина міняється на зворотну — в одиницю часу приймається більше хвиль, тобто хвилі стають коротшими і частота збільшується. Якщо передавач, встановлений, наприклад, на рухомому супутнику, випромінює радіохвилі з незмінною частотою f , то отримана приймачем частота становить:

$$f_{np} = f[1 \pm (V/v)] \quad (2.15)$$

де V — радіальна швидкість супутника (проекція вектора швидкості на напрям "супутник–приймач"), v — швидкість електромагнітних хвиль (в середовищі). Знак в дужках залежить від напрямку руху.

Таким чином, частота, що приймається, відрізняється від випромінюваної на величину:

$$\Delta f_D = |f_{np} - f| = f(V/v), \quad (2.16)$$

яка називається *доплерівським зсувом* (або *зміщенням*) *частоти*, чи просто доплерівською частотою [1]. Окрім "супутникового випадку" з випромінюванням радіо-хвиль, доплерівський зсув має місце і в оптичному діапазоні, зокрема, під час віддзеркалення світла від дзеркала, що рухається, під час роботи лазерних інтерферометрів переміщень. У цьому випадку світло від лазера з частотою ν (цією літерою прийнято позначати частоту в оптичному діапазоні), перш ніж потрапити у приймач, проходить подвійну відстань — до дзеркала (відбивача), що рухається, і назад, і формула (2.16) набуває вигляду:

$$\Delta \nu_D = \nu(2V/v), \quad (2.17)$$

де V — швидкість руху відбивача, v — швидкість світла в повітрі. Оскільки $v/\lambda = \nu$, то (3.4) можна переписати у вигляді:

$$\Delta \nu_D = 2V/\lambda. \quad (2.18)$$

Контрольні запитання

1. Що таке частота модуляції?
2. Складаються дві когерентні хвилі однакової амплітуди, лінійно поляризовані в ортогональних площинах. Яке відношення різниці фаз цих хвиль, під час якої результуюча хвиля буде мати відповідну поляризацію?
3. Гармонійні коливання піддаються амплітудній модуляції за гармонійним законом. Чи буде модульоване коливання гармонійним?
4. Що являють собою гармонійні коливання, які зазнають амплітудної модуляції по гармонійному закону?
5. Чи є періодичні коливання гармонійними?
6. Яким відношенням поєднана частота f з періодом T ?
7. Які три параметра повністю характеризують гармонічні коливання?
8. Що має дискретний спектр?
9. Який найбільш загальний випадок поляризації електромагнітних хвиль?
10. Що таке когерентні хвилі?
11. Як пов'язана довжина хвилі λ з частотою і швидкістю розповсюдження коливань?
12. Як називається величина $2\pi/\lambda$?
13. Як називається коливання, у якого який-небудь параметр змінюється в часі?
14. Як називається результат складання двох когерентних хвиль, лінійно-поляризованих в одній площині?
15. Що таке лазер?
16. З чого складається лазер?
17. Джерело накачки перевело активне середовище в стан з інверсною населеністю енергетичних рівнів. Під час переходу атомів назад на нижній рівень випускаються фотони, які створюють спонтанне випромінювання. Які з фотонів ініціюють перетворення спонтанного випромінювання у стимульоване?
18. В чому полягає роль резонатора в лазері?
19. Що являє собою монохроматичне випромінювання?
20. Що використовується для вимірювання відстаней до ШСЗ?
21. В результаті чого утворюється доплерівський зсув?

Лекція 5. Електронні вимірювання відстаней

Загальні принципи електронної віддалеметрії. Вимірювання відстаней за допомогою електромагнітних хвиль базується на визначенні часу і швидкості їх розповсюдження уздовж проміжку D , що вимірюється. Можуть бути два випадки.

У першому з них електромагнітні хвилі двічі проходять відстань D . Для чого на одному кінці лінії встановлюються передавач і приймач, а на іншому – відбивач, і відстань обчислюється за співвідношенням:

$$D = v\tau / 2, \quad (3.1)$$

де v – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль, τ – час розповсюдження уздовж дистанції в *прямому і зворотному напрямках*. Такий варіант (з проходженням сигналу "туди і назад") іноді називають запитальним методом, вважаючи, що передавач посилає до відбивача "сигнал запиту", а від відбивача приходить "сигнал відповіді".

У другому випадку хвилі проходять відстань, що вимірюється, тільки в одному напрямі: на одному кінці лінії є передавач, а на іншому – приймач, і відстань обчислюється за співвідношенням:

$$D = v\tau, \quad (3.2)$$

де τ — час *однократного* проходження дистанції. Цей варіант іменують беззапитним методом.

Беззапитний метод реалізується в глобальних супутникових системах, що визначають координати за вимірюваними відстанями. У всіх електронних віддалемірах, що використовуються як на наземних, так і на космічних трасах, використовується двократне проходження сигналу, тобто схема з відбивачем, і, відповідно, співвідношення (3.1). Тому подальший виклад даної теми стосуватиметься саме цього випадку.

Будь-яка віддалемірна апаратура надає інформацію про час розповсюдження τ . Швидкість v під час вимірювань на наземних трасах знаходять із співвідношення $v = c/n$ за відомим значенням швидкості світла у вакуумі $c = 299792458$ м/с і показником заломлення повітря n , який можна обчислити, вимірявши температуру, тиск і вогкість повітря (для світлових хвиль треба знати ще довжину хвилі). На космічних трасах, що включають іоносферу (під час вимірювання відстаней до супутників і Місяця) визначення швидкості v має свою специфіку.

Віддалеміри виміряють або безпосередньо часовий інтервал τ , або інший параметр, що є певною функцією від τ .

Фізична сутність всіх методів вимірювання відстаней полягає у порівнянні одного і того ж параметра, пов'язаного з електромагнітним випромінюванням, *до і після* проходження випромінюванням дистанції, що вимірюється. Для цього один і той же сигнал від передавача розділяється на дві частини і прямує на приймач одночасно по двох різних шляхах: безпосередньо (без виходу на дистанцію) і через дистанцію, що вимірюється (рис. 3.1).

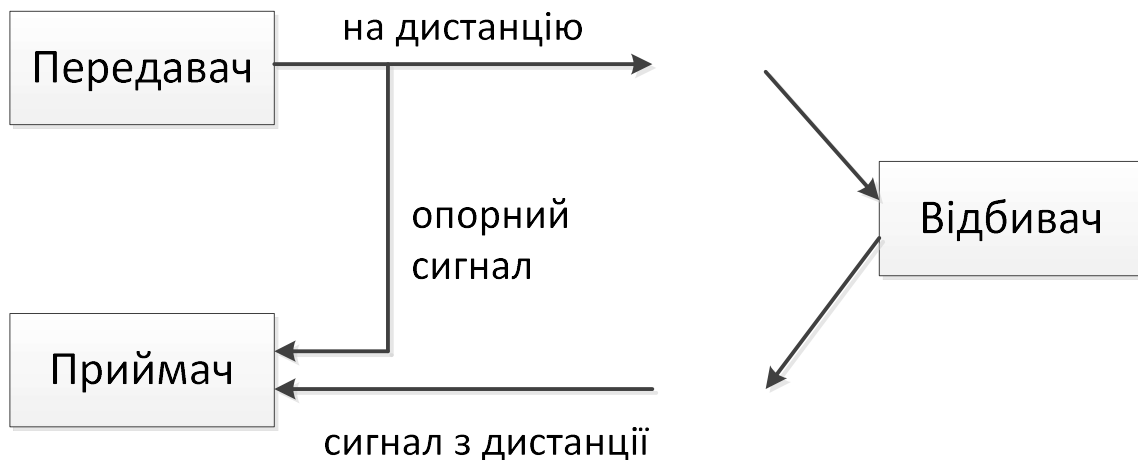


Рис. 3.1. Загальна схема вимірювання відстаней за допомогою електромагнітних хвиль

Перший шлях називають опорним каналом або трактом, а сигнал, що йде по ньому – опорним сигналом. Другий шлях утворює дистанційний (інформаційний) канал, і відповідно сигнал, що приходить від відбивача називають дистанційним або інформаційним сигналом.

Тобто тепер неважко уявити, з яких вимірювальних вузлів складаються електронні віддалеміри. Очевидно, що на одному кінці вимірювальної лінії в них є передавач електромагнітних хвиль, їх приймач та вимірювальний пристрій, а на другому кінці – відбивач. Ці вузли є основними.

У приймачі (під приймачем на рис. 3.1 розуміється приймально-вимірювальний пристрій) здійснюється порівняння опорного і інформаційного сигналів по вибраному параметру, або, іншими словами, вимірюється їх розбіжність по цьому параметру, яка і містить

інформацію про відстань, що вимірюється. Вибір параметра визначає метод вимірювання відстані. Такими параметрами частіше за все є час приходу імпульсу випромінювання (під час імпульсного випромінювання) та фаза коливання (під час безперервного випромінювання). В останньому випадку це може бути або фаза гармонійного (синусоїдального) коливання, безпосередньо випромінюваного передавачем, або, якщо це коливання (несуче), *модульоване*, – фаза модулюючого сигналу. Відповідно розрізняють наступні методи вимірювання відстаней:

- часовий (імпульсний), з вимірюванням безпосередньо часу розповсюдження імпульсу;
- фазовий, з вимірюванням різниці фаз на несучій частоті;
- фазовий, з вимірюванням різниці фаз на частоті модуляції.

Часовий метод. Схема його реалізації показана на рис. 3.2. Передавач випромінює короткий імпульс, який розділяється на два: опорний і спрямований на дистанцію. Опорний імпульс запускає вимірник часових інтервалів, а імпульс, що повернувся з дистанції через час τ , зупиняє відлік часу.

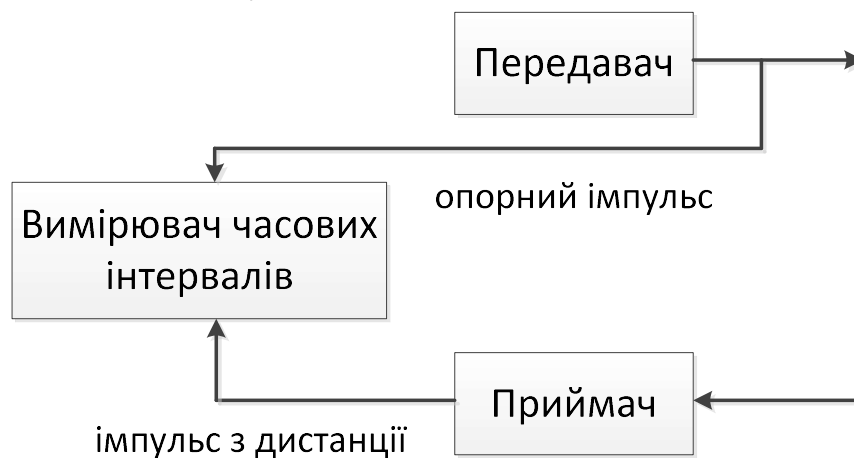


Рис. 3.2. Схема реалізації часового методу

Відстань обчислюється безпосередньо за формулою (3.1). Вимірник часових інтервалів будується за схемою, принцип якої ілюструється на рис. 3.3. Генератор виробляє безперервну послідовність гостроконечних *лічильних імпульсів* з періодом повтору $T_{\text{ліч}}$. Ці імпульси через електронний ключ надходять на лічильник.

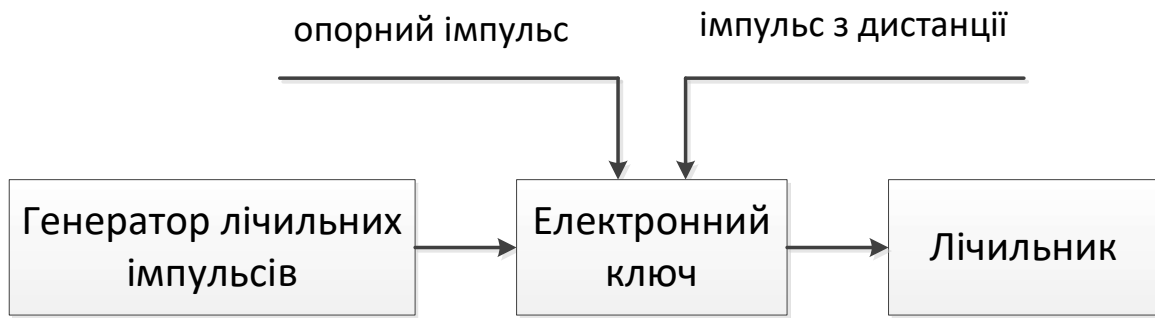


Рис. 3.3. Принцип побудови вимірника часових інтервалів

Електронний ключ — це свого роду "ворота", які можуть відкриватися, пропускаючи імпульси на лічильник, і закриватися, припиняючи рахунок. Вони відкриваються опорним імпульсом випромінювання (старт-імпульс) і закриваються імпульсом випромінювання, що прийшов з дистанції (стоп-імпульс). Таким чином, електронний ключ виявляється відкритим на час τ , протягом якого імпульс випромінювання двічі проходить дистанцію і який необхідно виміряти. Очевидно, що τ можна визначити по числу m імпульсів, підрахованих лічильником за цей час: $\tau = mTk_{\text{ліч}} = m / f_{\text{ліч}}$, де $f_{\text{ліч}}$ — частота проходження лічильних імпульсів. Але найзручнішим було б, якби лічильник відразу показував величину вимірюваної відстані. Це можна зробити, якщо взяти $f_{\text{ліч}}$ чисельно рівну половині швидкості розповсюдження випромінювання (в певних атмосферних умовах).

Дійсно, якщо в основну формулу для відстані $D = v\tau / 2$ підставити вираз $\tau = m / f_{\text{ліч}}$, то отримаємо $D = vm / 2f_{\text{ліч}}$. Якщо тепер взяти $f_{\text{ліч}} = v / 2$, то отримаємо $D = m$, тобто число імпульсів, що показується лічильником, безпосередньо виражатиме собою відстань D . (Ми не розглядаємо такі неістотні тут деталі, як питання розмірності). В отриману величину D вводиться поправка за відмінність реальної швидкості v від "закладеного в прилад" значення.

Оскільки лічильник може рахувати лише ціле число імпульсів, то виникає помилка дискретності рахунку, яка тим менша чим менше $T_{\text{ліч}}$, тобто чим більша частота проходження лічильних імпульсів. Крім того, важко отримати імпульси випромінювання малої тривалості з крутим фронтом. Тому імпульсний метод характеризується порівняно великою абсолютною похибкою. Похибка для вимірювання τ у 10 нс, дає помилку

у відстані 1,5 м. Тому імпульсний метод вигідно використовувати для вимірювання великих відстаней, коли відносна похибка вимірювання виходить малою.

Найбільш ефективно застосування імпульсного методу в оптичному діапазоні для вимірювання дуже великих відстаней, зокрема, до ШСЗ, що і використовується в лазерній супутниковій віддалеметрії. Оскільки відстані великі, то лазерний імпульс повинен мати дуже велику потужність; вона тим більша, чим менша тривалість імпульсу. Для вимірювання відстаней до ШСЗ застосовуються твердотільні лазери. Довгий час типове значення тривалості імпульсу складало приблизно 10 нс для пікової потужності до 100 Мвт.

В останньому поколінні таких віддалемірів застосовуються пікосекундні твердотільні лазери на гранаті, які генерують оптичні імпульси надкороткої тривалості порядку десятків пікосекунд ($1\text{пс} = 10^{-12}\text{с}$) з піковою потужністю до декількох гігаватт ($1\text{Гвт} = 10^9\text{Вт}$). За час в 1 пс світло проходить 0,3 мм, і застосування пікосекундних лазерів забезпечує різке підвищення точності імпульсного методу.

Фазовий метод на модульованому випромінюванні. Цей метод використовується у всіх наземних геодезичних і топографічних світловіддалемірах і радіовіддалемірах, межа дальності дії яких може лежати в діапазоні від декількох кілометрів до декількох десятків кілометрів.

Джерело світла або радіохвиль випромінює несучі гармонійні коливання виду $A\sin(\omega t + \varphi_0)$. Але перед виходом випромінювання на дистанцію який-небудь з цих параметрів (у світловіддалемірах звичайно амплітуда A , яка визначає інтенсивність світла, а у радіовіддалемірах – частота f) піддається модуляції по синусоїдальному закону з деякою частотою F , набагато меншою несучої частоти f . Тобто, наприклад, у світловіддалемірах інтенсивність світла, що виходить на дистанцію, стає то більшою, то меншою, і це відбувається з частотою модуляції F (див. рис. 2.3, *a*). У світловому потоці виникає огинаюча – синусоїда з частотою F . Фаза цієї синусоїди після проходження світлом відстані $2D$ (до відбивача і назад) відрізнятиметься від фази у момент випромінювання на величину ϕ , яка залежить від часу розповсюдження τ :

$$\phi = 2\pi Ft = 2\pi F(2D / v). \quad (3.3)$$

Цю різницю фаз виміряють фазометром, включеним між

передавачем і приймачем. З (4.3) випливає, що шукану відстань D можна обчислити за формулою:

$$D = (v / 2F) (\Delta\phi / 2\pi). \quad (3.4)$$

На рис. 3.4 показана узагальнена схема реалізації фазового методу з вимірюванням різниці фаз на частоті модуляції F .

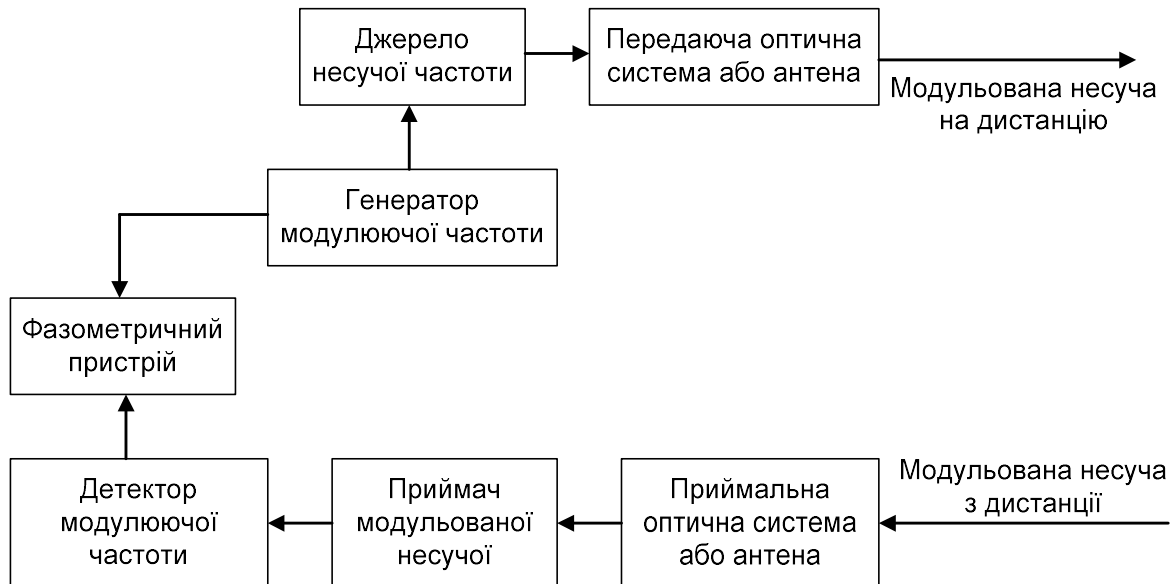


Рис. 3.4. Функціональна схема фазового віддалеміра

Оскільки фаза – кутова величина, значення якої повторюється через кожні 360° , тобто 2π , то загальний фазовий зсув ϕ у формулі (3.3) можна представити у вигляді:

$$\phi = 2\pi N + \Delta\phi, \quad (3.5)$$

де N – ціле число повних фазових циклів по 2π , а $\Delta\phi$ – дробова частина циклу, менша 2π . Будь-який фазометр може виміряти різницю фаз тільки в межах від 0 до 2π , тобто тільки $\Delta\phi$. Число ж N залишається невідомим.

Підставивши (4.5) в (4.4), отримаємо *основне рівняння фазової віддалеметрії*:

$$D = (v / 2F) (N + \Delta\phi / 2\pi), \quad (3.6)$$

яке часто записують в більш простому вигляді:

$$D = (\lambda / 2) (N + \Delta N), \quad (3.7)$$

де $\lambda = v / F$ – довжина хвилі модуляції, $\Delta N = \Delta\phi / 2\pi$ – дріб, менший за одиницю.

Частоту модуляції F часто називають *масштабною частотою*, оскільки відповідна їй довжина хвилі λ є тією масштабною мірою, яка "укладається" на відстані $2D$ (або, що те ж саме, половина довжини хвилі укладається на відстані D). Число укладень складає $(N + \Delta N)$, що наочно видно з формули (4.7).

В основному рівнянні фазової віддалеметрії два невідомих: D і N . Таке рівняння не має однозначного розв'язку, і виникає так звана *проблема вирішення неоднозначності* (часто використовують також термін *багатозначність*) – проблема визначення цілого числа N .

Вирішення проблеми багатозначності у фазових віддалемірах. У більшості сучасних світловіддалемірів і у всіх радіовіддалемірах багатозначність вирішують так званим способом фіксованих частот, у віддалемірі передбачають кілька точно відомих частот модуляції, що перемикаються.

Під час всіх варіантах цього способу вони базуються на одній і тій же ідеї: наявність декількох частот дає можливість створити ряд масштабних довжин хвиль, перша з яких відповідає основній (найвищій) частоті модуляції, а кожна подальша більше на ціле число разів. Це число звичайно приймається рівним 10, а перша частота в автоматизованих віддалемірах частіше всього така, щоб відповідна їй напівхвиля складала (для стандартних метеоумов) 10 м (частота ≈ 15 МГц), що зручно для створення десяткової системи розрядів (так званий порозрядний спосіб). Якщо напівхвиля $\lambda_1 / 2 = 10$, то наступні значення будуть $\lambda_2 / 2 = 100$ м $\lambda_3 / 2 = 1000$ м і т.д. Для цих масштабних довжин напівхвиль можна записати рівняння вигляду (3.7) з своїми значеннями N і ΔN .

Що ж нам дає наявність ряду цих десятиразово збільшених напівхвиль? Річ у тому, що під час способу фіксованих частот, скільки б їх не було, для вирішення задачі потрібна додаткова умова — знання наближеного значення дистанції, що вимірюється ($D_{\text{набл.}}$). Все питання в тому, з якою точністю потрібно його знати. Якщо в віддалемірі тільки одна фіксована частота (довжина хвилі), то для безпомилкового визначення числа N треба знати відстань з помилкою менше чверті довжини хвилі. Це виходить безпосередньо з рівняння (3.7). Дійсно, записавши його у вигляді:

$$N = (2D / \lambda) - \Delta N \quad (3.8)$$

і перейшовши до середніх квадратичних помилок m , отримаємо:

$$m_N = (2 / \lambda) m_D. \quad (3.9)$$

Щоби ціле число N було визначено вірно, його помилка повинна бути менше ніж 0,5. Поставивши умову $m_N < 0,5$, з (4.9), знайдемо:

$$m_D = (\lambda / 4). \quad (3.10)$$

Наперед знати D з такою точністю (для наведеного вище випадку – з похибкою менше ніж 5 м) можна для дуже коротких відстаней. Для відстаней, що обчислюються кілометрами і десятками кілометрів, дана вимога не може бути виконана навіть під час наявності великомасштабних карт. Створення ж вказаного вище ряду довжин хвиль дає можливість знати $D_{набл.}$ набагато грубіше. Кожний ступінь знижує вимоги до точності значення $D_{набл.}$ у 10 разів, і в результаті його необхідно знати з помилкою менше чверті найбільшої довжини хвилі. Якщо вона складас, скажімо, 20 000 м (напівхвиля 10 000 м), то допустима помилка повинна бути менше 5 км; іншими словами, треба знати, скільки *цілих* 5-кілометрових відрізків міститься у відстані, що вимірюється.

Склавши для кожної з напівхвиль, що збільшуються у 10 разів рівняння вигляду (3.7) і додавши до них рівняння $D = D_{набл.}$, ми одержуємо однозначно розв'язувану систему. Оскільки в цих рівняннях числа N на кожному ступені показують відповідну кількість десятиметрових, стометрових, тисячаметрових і т.д. відрізків, що розміщуються на вимірюваній дистанції, то обробка вимірювань, виконаних на всіх частотах, зводиться просто до визначення десяткових розрядів в значенні відстані без обчислення самих чисел N . Найточніший розряд і його частки визначають на першій частоті.

У деяких світловіддалемірах багатозначність вирішують іншим методом – плавної зміни частоти модуляції. У цьому способі вручну або автоматично підбирають дві (або кілька) такі частоти, для яких у відстані укладається ціле число N напівхвиль модуляції (різне для цих частот), тобто в рівняннях вигляду (3.7) $\Delta N = 0$, і ці частоти вимірюють. У віддалемірі передбачають пристрій, що дає змогу фіксувати моменти,

коли $\Delta N = 0$, і, отже, розрахувати різницю чисел N для цих частот. Знаючи цю різницю і самі частоти, можна легко обчислити і цілі числа N , тобто вирішити багатозначність.

Спосіб плавної зміни частоти не вимагає знання наближеної відстані, але не можна виміряти відстань, меншу певної межі. Ця межа дорівнює:

$$D_{min} = v / \Delta F, \quad (3.11)$$

де v – швидкість світла, ΔF – максимальний діапазон зміни частоти модуляції.

Фазовий метод на несучій частоті. Для цього методу працюють на не модульованому випромінюванні, вимірюючи різницю фаз випромінюваних і прийнятих електромагнітних хвиль. Фазові вимірювання на не дуже високій несучій частоті, що відповідають діапазону довгих і середніх радіохвиль, часто використовуються у радіогеодезичних системах (РГС), призначених для визначення координат рухомих об'єктів на морі, землі і в повітрі (кораблів, літаків, автотранспортних засобів); проте в даний час РГС значною мірою витиснуті супутниковими системами. Фазовий метод на несучій частоті в оптичному діапазоні називається інтерференційним, бо він заснований на безпосередній реєстрації результату інтерференції двох світлових пучків. Цей метод буде розглянуто в подальшому [8, 10, 11, 26].

Світловідалеміри. Функціональні схеми світловідалемірів. Світловідалеміри, які використовуються для геодезичних вимірювань, відрізняються один від одного радіусом дії, послідовністю вимірювань ліній, функціональною схемою тощо.

Середня квадратична похибка вимірювання ліній віддалеміром залежить від довжини лінії:

$$M = a + b \cdot 10^{-6} \cdot L, \quad (3.12)$$

де a , мм – частина середньої квадратичної похибки, що не залежить від довжини лінії; $b \cdot L$ – частина квадратичної похибки, що залежить від довжини лінії (у міліметрах на кожний кілометр лінії).

Віддалеміри характеризуються певною точністю (значення a і b), а також радіусом дії радіусом дії, тобто верхньою та нижньою межею вимірюваних довжин ліній. Крім того їх поділяють за принципом дії та за конструкцією. Згідно з ДЕСТ світловідалеміри поділяють на:

1) геодезичні світловіддалеміри, що слугують для створення державних геодезичних мереж ($a=5, 10$; $b=1,2$; $L=0,5\ldots 50$ км);

2) прецизійні, які слугують для високоточних вимірювань в геодезії ($a=0,3\ldots 1,2$; $b=0,5\ldots 3,0$; $L=0,002\ldots 3,0$ км);

3) топографічні, для створення геодезичних мереж згущення, знімальних мереж і для топографічного знімання ($a=5, 10$; $b=2\ldots 5,0$; $L=0,002\ldots 15,0$ км).

Всі фазові віддалеміри із чотирьох основних вузлів: передавача, приймача, фазовимірювального пристрою та відбивача. Три перші вузли розміщують на одному кінці лінії, а відбивач – на другому.

Передавач випромінює високочастотні несучі коливання, які є модульовані вимірювальними коливаннями. У світловіддалемірах несучими є електромагнітні коливання оптичного діапазону, джерелом яких може бути лампа, світлодіод або лазер. Джерелом вимірювальних коливань є генератор, напруга з якого прикладається до модулятора. Світловий промінь з джерела проходить через модулятор і в ньому під впливом вимірювальної напруги відбувається модуляція світлового променя. У світловіддалемірах використовують два види модуляції: за інтенсивністю або за формою еліпса поляризації.

Передавальна оптична система висилає модульований промінь вздовж лінії, яку вимірюють. Таким чином передавач світловіддалеміра складається із джерела світла, модулятора, генератора вимірюваних коливань і передавальної оптичної системи (рис. 3.5). Якщо джерелом світла є світлодіод, то модуляцію інтенсивності його випромінювання проводять прикладанням вимірювальної напруги безпосередньо до світлодіода.

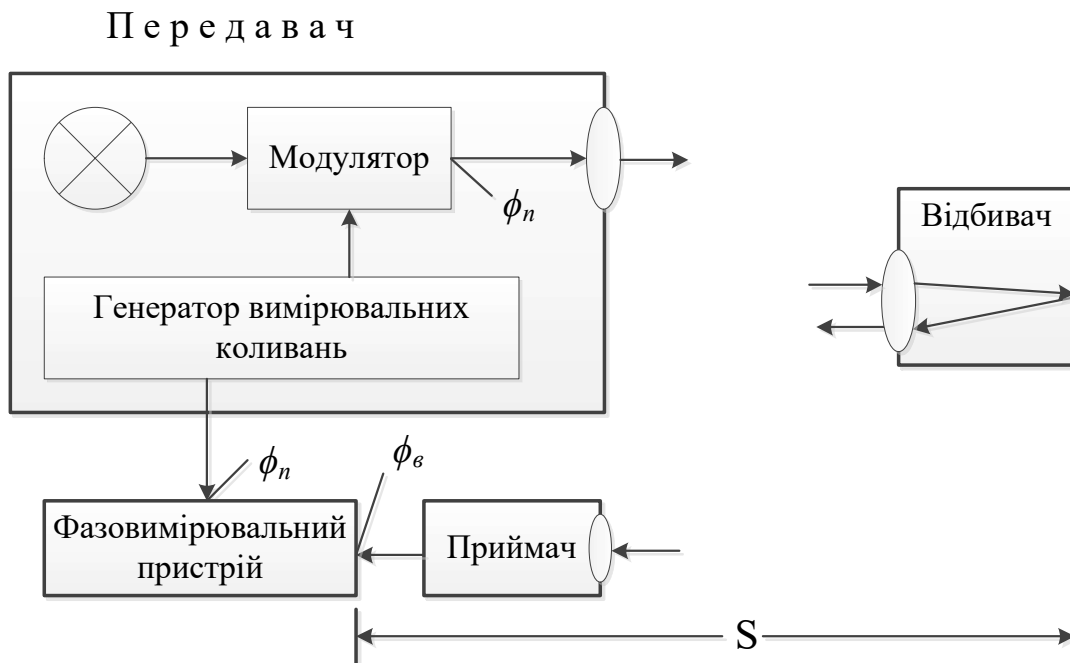


Рис. 3.5. Загальна функціональна схема світловіддалеміра [3]

Відбивачі світловіддалемірів пасивні, бо вони тільки відбивають світловий промінь в напрямку на приймач, який знаходиться біля передавача. Основною їх частиною є дзеркальна поверхня, яка відбиває присланий промінь.

Приймачем світловіддалемірів є приймальна оптична система. Вона вловлює світло, відбите відбивачем, і скеровує його на фазовимірювальний пристрій.

На фазовимірювальний пристрій крім коливань з приймачем подають вимірювальну напругу із генератора передавача. Біжуча фаза цієї напруги дорівнює фазі модуляції ϕ_n на початку його шляху. Фаза модуляції світлового потоку дорівнює фазі модулюючої напруги в точці його виходу з модулятора. Тому початком вимірюваної лінії в світловіддалемірах є вихід з модулятора. Фазою ϕ_n вважають фазу модуляції відбитого світлового променя на вході в фазовимірювальний пристрій, бо там закінчується шлях променя. Завданням фазовимірювального пристрою є виміряти різницю біжучих фаз $\phi_n - \phi_\epsilon = \Delta\phi$.

Залежно від типу фазометра світловіддалеміри поділяють на три покоління. У світловіддалемірів першого покоління використовують оптичні фазометри, другого — аналогові, а третього — цифрові фазометри. В останніх процес вимірювань автоматизований.

Характерною особливістю світловіддалемірів *першого покоління*

(рис. 3.6) є визначення різниці фаз $\Delta\varphi$ оптичними фазометрами на частоті модуляції світла. У наш час у віддалемірів першого покоління реєстрація різниці фаз, як і обчислення довжини лінії автоматизовані. Віддалеміри першого покоління складні і дорогі вимірювальні прилади, проте їхня точність переважає недоліки. Позаяк ці віддалеміри застосовують тільки для високоточних інженерно-геодезичних робіт, а також для створення державних мереж, їх не можна зарахувати до приладів широкого вжитку і фірми виготовляють їх зазвичай невеликими партіями.

Раніше користувався попитом геодезичний світловіддалемір – напівавтомат СГЗ. Результат вимірювань – довжина лінії – висвітлюється на табло. Прилад працює у режимах "грубо" і "точно". Середня квадратична похибка віддалі, виміряної десятима прийомами в режимі "точно", становить $4 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$ ($L = 0,5 \dots 30 \text{ км}$).

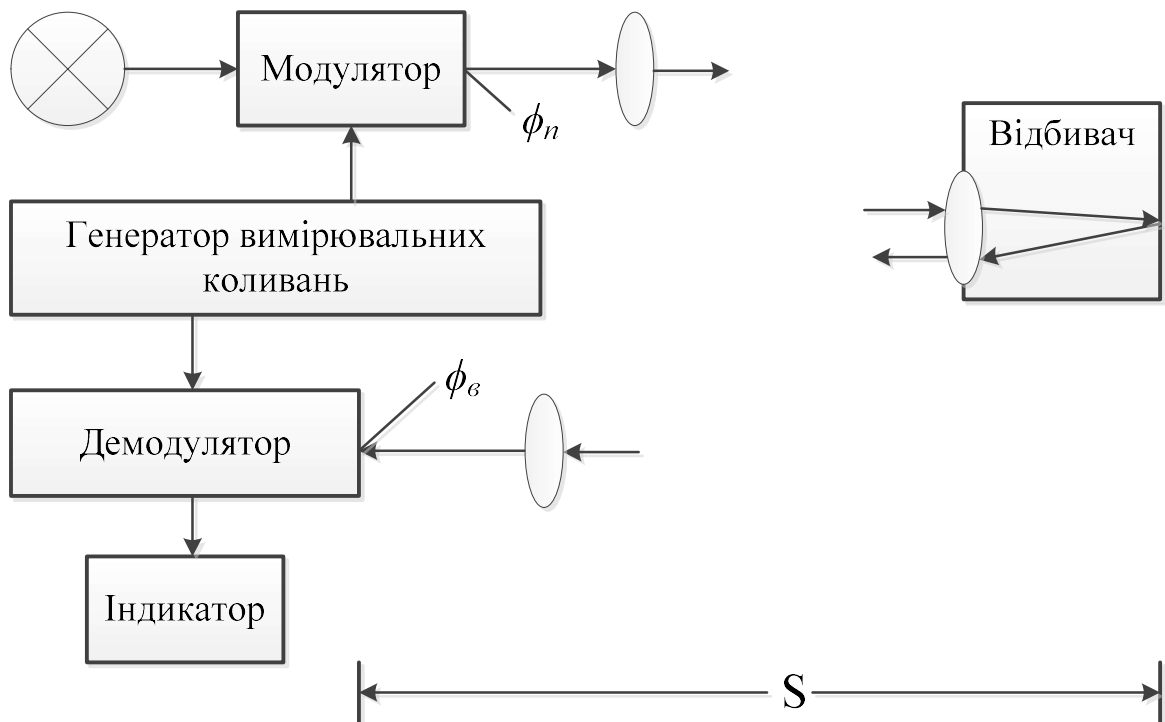


Рис. 3.6. Загальна функціональна схема світловіддалеміра першого покоління [14]

У Великобританії випускали високоточні прецизійні віддалеміри – меккометри Ме 3000, Ме 5000. Діапазон дії, наприклад, Ме 5000 – $0,02 \dots 8,0 \text{ км}$.

Точність вимірювань $0,2 \text{ мм} + 0,2 \cdot 10^{-6} L$. В обох приладах враховано вплив метеорологічних параметрів на результат визначення довжини

лінії. Не поступилися загаданим і Геомесори, що випускали згодом, наприклад, CR 204, а модель Георан 2 має радіус дії до 50 км.

Поширення застосування електроніки у геодезичному приладобудуванні, а зокрема у віддалемірній техніці, дало змогу створити віддалеміри *другого покоління*, в яких замість оптичних використовують електронні фазометри, знижена частота коливань, але збережена їхня різниця фаз. В цих віддалеміра світло модулюють лише за інтенсивністю. За призначенням світловіддалеміри другого покоління можуть бути топографічними і геодезичними. Істотним їхнім недоліком є обмеженість можливості автоматизації вимірювань.

Прикладом серійних топографічних віддалемірів другого покоління є ЕОК 2000 фірми Carl Zeiss Jena.

З геодезичних віддалемірів другого покоління можна відзначити світловіддалемір "Гранат" (СРСР), що має радіус дії до 20 км, а середню квадратичну похибку результату вимірювань одним прийомом $5 \text{ мм} + 2 \cdot 10^{-6} L$. Вимірювання лінії виконують декількома прийомами. Середнє значення довжини лінії з усіх прийомів виправляють приладовою і метеорологічною поправками. До віддалемірів другого покоління належать прилади фірми AGA Geotronics, наприклад, Геодиметр 600, радіус дії якого 40 км, а точність до $1 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$, якої, щоправда, можна досягти за 30 хв. вимірювань. Геодиметр 8, що одержав широке визнання, має радіус дії від 15 до 60 км, а точність результату вимірювань $5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$.

У світловіддалемірах третього покоління для вимірювання різниці фаз застосовують цифрові фазометри. Фазові вимірювання виконують на низькій частоті. Загалом світловіддалеміри третього покоління характеризують високим ступенем автоматизації. Часто вони устатковані міні-ЕОМ завдяки чому є можливість, наприклад, обчислити середнє із ряду вимірювань, виключити багатозначність, оцінити точність отриманих результатів тощо. Програмне забезпечення передбачає введення метеорологічних поправок у виміряні довжини ліній, обчислення горизонтальних прокладень ліній, приростів координат і самих координат тощо. До багатьох прийомопередавачів можна під'єднувати накопичувач інформації.

Віддалеміри третього покоління (рис. 3.7), що працюють в імпульсному режимі, називають імпульсно-фазовими. Радіус дії світловіддалемірів третього покоління здебільшого не перевищує 15 км,

тому вони звичайно є топографічними або прецизійними віддалемірами. Вони малогабаритні, легкі і можуть слугувати віддалемірними насадками до теодолітів.

До фазових віддалемірів третього покоління належать 2СМ2, СПОЗ, та інші, що випускалися в СРСР. Імпульсно-фазові світловіддалеміри СМ5, СТ5, 2СТ2 (всі СРСР) широко використовувалися на геодезичному виробництві.

Розглянемо детальніше призначення та технічні характеристики світловіддалеміра СТ 5 (“Блєск” або 3СМ2). Світловіддалемір “Блєск” СТ 5 (рис. 3.8, рис. 3.9) призначений для вимірювання довжин сторін полігонометрії IV класу, у полігонометрії 1-го та 2-го розрядів та у геодезичних роботах з будівництва.

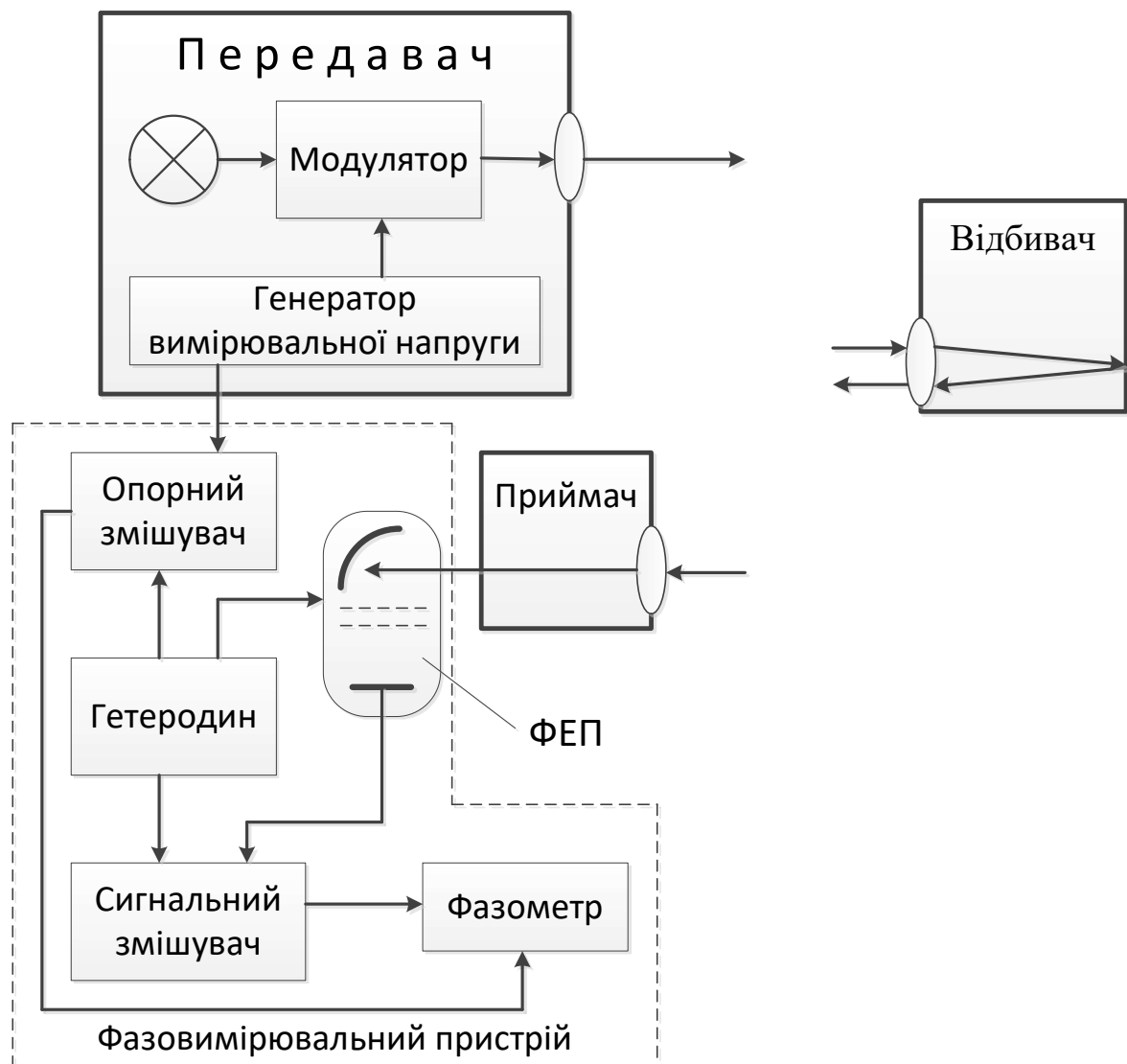


Рис. 3.7. Загальна функціональна схема світловіддалемірів другого і третього поколінь [14]

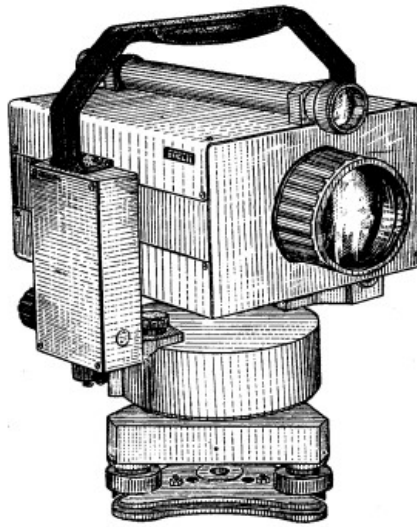


Рис. 3.8. Зовнішній вигляд світловіддалеміра СТ 5

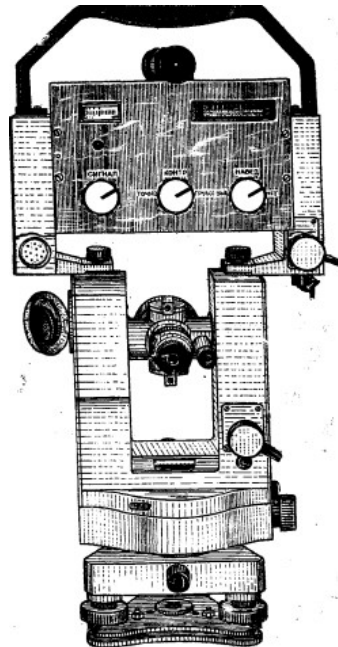


Рис. 3.9. Світловіддалемір СТ 5 на теодоліті 2Т5К

Світловіддалемір можна встановлювати на теодоліти серії 2Т і 3Т для одночасного вимірювання кутів і відстані. У світловіддалемірі застосовано імпульсно-фазовий метод вимірювання відстані з перетворенням тимчасового інтервалу. Вимірювання виконується із застосуванням двох частот проходження імпульсів що випромінюються: $f_1 = 14985,5$ КГц і $f_2 = 149,855$ КГц. Тривалість імпульсів 10 нс. Джерелом випромінювання є напівпровідниковий лазерний діод із довжиною хвилі випромінювання 0,86 мкм, приймачем – фотоелектронний помножувач (ФЭУ).

Діапазон однозначних показань світловіддалеміра 0... 999999 мм. Похибка вимірювання (у міліметрах) у режимі ТОЧНО не перевищує значення $10+5\cdot 10^{-6} S$, що забезпечується послідовним вимірюванням на частотах f_1 , і f_2 . Похибка виміру в режимі ГРУБО не перевищує 20 см (табл. 3.1). Вимір у режимі ГРУБО здійснюється тільки на частоті f_2 . Для ослаблення сигналу під час виміру малих відстаней на об'єкти світловіддалеміра надівають атенюатор. Під час включення світловіддалеміра загоряється кома третього зліва індикатора табло. Виявлення сигналу індукується звуковим сигналом мікротелефону.

Таблиця 3.1

Технічна характеристика світловіддалеміра СТ 5

Діапазон вимірювання віддалей, м	0,2 ... 5000
Скп результату вимірювання одним прийомом, мм	$10+5\cdot 10^{-6} L$
Граничні кути нахилу ліній що вимірюються	$\pm 20^\circ$
Ціна одиниці молодшого розряду табло, мм	1
Збільшення зорової труби	12^x
Зображення зорової труби	пряме
Поле зору труби	3°
Вимірювальні частоти, кГц	$f_1 = 14985,5$ $f_2 = 149,855$
Частота на якій працює фазометр: в режимі ТОЧНО, кГц в режимі ГРУБО, кГц	$F=1,49855$ $F=14,9855$
Частота проходження заповнюючих імпульсів, імп/с: в режимі ТОЧНО в режимі ГРУБО	7942500 1498550
Потужність живлення, Вт	5
Напруга живлення, В	5,8...6,5
Маса світловіддалеміра, кг	4,5
Маса повного комплекту, кг	60
Умови експлуатації: температура, $^\circ\text{C}$	-30...+40
тиск, гПа	840...1067
відносна вологість, %	до 98

Точне наведення на відбивач здійснюють за показниками, стрілочного приладу. Процес рахунку індукується висвітленням коми крайнього справа індикатора табло. Початок висвітлення результату супроводжується звуковим сигналом мікротелефону. У режимі

КОНТРОЛЬ за показаннями стрілочного приладу оцінюють напругу джерела живлення (акумуляторної батареї), а з табло знімають показання для визначення поправочного коефіцієнта, що враховує температурну зміну частоти кварцового генератора. За допомогою резистора установки значення контрольного відліку постійна поправка світловіддалеміра може бути зведена до нуля. Значення контрольного відліку, що відповідає нульовому значенню постійної поправки під час роботи з відбивачами, що входять у комплект світловіддалеміра, зазначено в паспорті світловіддалеміра. У світловіддалемірі є вихід для підключення реєструючого пристрою. За кордоном розповсюджені світловіддалеміри з вимірюванням різниці фаз на низьких частотах. Переважають в основному імпульсно-фазові віддалеміри, в яких потужність живлення є незначною, а процес вимірювання більший чи менший мірі автоматизований.

Серед закордонних світловіддалемірів найбільш поширеними є малі топографічні, в яких джерелом світла є світлодіод, в сучасних переважають напівпровідникові лазери. Більшість цих світловіддалемірів можна встановити на штативі або прикріплювати до теодоліта, отримуючи прилад на кшталт тахеометра.

Геодезичних та прецизійних світловіддалемірів небагато, бо вони є більші за розмірами, масою і мають більшу потужність живлення. Геодезичні світловіддалеміри, в яких джерелом світла є напівпровідникові лазери вимірюють відстані до 10 км і більше.

Відомі фірми AGA Geotronics (рис. 3.10), Leica, Trimble-Zeiss, Sokkia виготовляють численні віддалеміри. Так, AGA Geotronics виготовляє топографічні віддалеміри "Геодиметр" (назва отримана шляхом поєднання GEOdetic Distance METER) моделей 10, 12, 12 A, 14, 110, 112, 216 та ін. Кожна з моделей має свої характерні особливості, що дає змогу рекомендувати її переважно для певного виду робіт. Наприклад, Геодиметр 110 зручний для створення геодезичної мережі для великомасштабного знімання та для винесення проектів в натуру. Крім того, він може працювати у режимі відстеження. Геодиметри 210, 216, 220 є мікровіддалемірами, що мають винятково малу масу і габаритні розміри. Їх можна закріплювати на зорових трубах оптичних теодолітів.



Рис. 3.10. Зовнішній вигляд світловіддалеміра Геодиметр 14 фірми AGA Geotronics

Крім того ця фірма випускає геодезичний світловіддалемір Геодиметр 6000, радіус дії якого становить до 35 км, а точність $5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$ (табл. 3.2). Джерелом світла є напівпровідниковий лазер, який працює в імпульсному режимі з вимірювальною частотою 14,984644 МГц. Світловіддалемір може працювати в режимі трекінг – відстежування рухомої цілі.

Таблиця 3.2

Технічні характеристики світловіддалемірів фірми AGA Geotronics

Моделі віддалемірів	Радіус дії, км	Точність, мм	Час вимірювання, с	Маса, кг
Геодиметр 10	2,2	$5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$	10...15	2,5
Геодиметр 12	2,6	10	10...15	2,5
Геодиметр 12 А	3,0	$5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$	10...15	2,5
Геодиметр 14	10,0	$5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$	10...15	2,5
Геодиметр 110	1,0	$10 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$	10...15	2,5
Геодиметр 112	4,8	$5 \text{ мм} + 3 \cdot 10^{-6} L$	5...10	2,6
Геодиметр 216	2,3	$5 \text{ мм} + 5 \cdot 10^{-6} L$	5	1,3

Фірма Leica (Wild) (табл. 3.3) пропонує світловіддалеміри типу Дістомат, наприклад, DI 1001, DI 1600, DI 2002, DI 3000 (рис. 3.11), DI 3000 S, які здебільшого є насадками на теодоліт. В них передбачена автоматична реєстрація результатів вимірювань та перетворення даних.

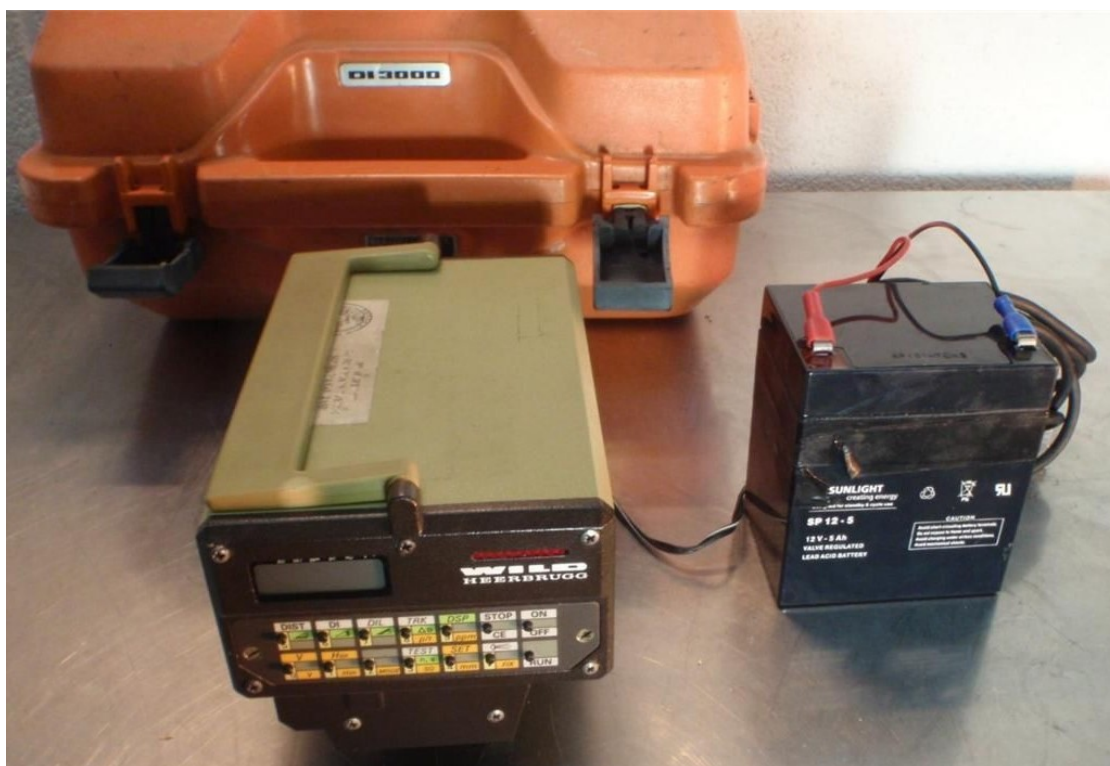


Рис. 3.11. Зовнішній вигляд світловіддалеміра фірми Wild DI 3000

Таблиця 3.3

Технічні характеристики світловіддалемірів фірми Leica (Wild)

Режим/характеристика		DI 1001	DI 1600	DI 2002	DI 3000S
DIST	Точність	5 мм + 5·10 ⁻⁶ S	3 мм + 2·10 ⁻⁶ S	1 мм + 1·10 ⁻⁶ S	3 мм + 1·10 ⁻⁶ S
	Час	1.5 с	1.5 с	<3 с	3.5 с
DIL	Точність	—	3 мм + 2·10 ⁻⁶ S	1 мм + 1·10 ⁻⁶ S	3 мм + 1·10 ⁻⁶ S
	Час	—	1.5 с	2 с	3.5 с
Tracking	Точність	10 мм + 5·10 ⁻⁶ S	10 мм + 2·10 ⁻⁶ S	5 мм + 1·10 ⁻⁶ S	10 мм + 1·10 ⁻⁶ S
	Час	0.3 с	0.3 с	0.3 с	0.3 с
Rapid tr	Точність	—	20 мм + 2·10 ⁻⁶ S	—	10 мм + 1·10 ⁻⁶ S
	Час	—	0.15 с	—	0.07 с
Schnellmes	Точність	—	—	3 мм + 1·10 ⁻⁶ S	10 мм + 1·10 ⁻⁶ S
	Час	—	—	1.5 с	0.8 с
Радіус дії	1 призма	800 м	2.5 км	2.5 км	9 км

Режим/характеристика		DI 1001	DI 1600	DI 2002	DI 3000S
	2 призми	1100 м	3.5 км	3.5 км	11 км
	11 призм	—	5 км	5 км	13 км
Маса	віддалеміра	0.5 кг	0.6 кг	0.6 кг	1.7 кг
	проти ваги	0.5 кг	0.5 кг	0.5 кг	1.2 кг

Залежно від моделі ними можна виконувати геодезичні роботи від топографічного знімання до точної полігонометрії перші моделі насадки призначені для трасування та знімання деталей, друга – топографічного знімання і полігонометрії, третя – високоточний далекомір, який призначений для спостережень за деформаціями, контрольних вимірювань та точної полігонометрії. Модель DI 3000 S має радіус дії до 19 км і високу точність вимірювань, що дає змогу використовувати цей прилад під час прокладання ходів полігонометрії та визначення положення об'єктів, які рухаються.

Фірма Trimble-Zeiss (табл. 3.4) пропонує топографічні світловіддалеміри третього покоління типу Eldi: Eldi 1, Eldi 2, Eldi 2S, Eldi 3, Eldi 4, Eldi 2 Mining, які відрізняються один від одного переважно радіусом дії.

Таблиця 3.4

Технічні характеристики світловіддалемірів фірми Trimble-Zeiss

Моделі віддалемірів	Радіус дії, км	Точність, мм
Eldi 1	4-5	$5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$ (у коротшому радіусі дії) $10 \dots 20 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$ (у довшому радіусі дії)
Eldi 2	2-3	
Eldi 3	1-1,5	
Eldi 4	3,5	$5 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} L$

У віддалемірі Eldi 1 джерелом світла служить напівпровідниковий лазер, який випромінює коливання з довжиною хвилі 0,91 мкм. У віддалемірі є три вимірювальні частоти: 30 МГц, 300 і 15 КГц. Приймальна передавальна система коаксіальна. Після підготовки віддалеміра вимірювання відбуваються автоматично. Результат висвітлюється на дисплеї впродовж 5 с. цей світловіддалемір встановлюється на штативі. Інші вищезазначені моделі можна

встановлювати на штативі або на теодоліті, тобто вони є не тільки віддалемірами, але й віддалемірними насадками.

Світловіддалемір Eldi 2 Mining призначений для виконання вимірювань в копальнях. Його можна встановлювати лише на штативі. Також ця фірма випускає світловіддалемір Eldi 10, який працює в імпульсному режимі. Радіус дії для відбивача з однієї призми складає 7 км, з трьох – 8,5 км, максимальний – 16 км. Світловіддалемір Eldi 10 працює в трьох режимах: стандартному, режимі відстежування та спеціальному. Точність вимірювання ліній в стандартному режимі становить $5 \text{ мм} + 3 \cdot 10^{-6} L$.

Фірма Sokkia (Японія) пропонує компактні топографічні світловіддалеміри Red, які можна встановлювати на штативі або на теодоліті. Джерелом світла в них служить світлодіод на арсеніді галію. Вимірювання ліній виконується на трьох вимірювальних частотах. Віддалеміри можуть працювати з нерухомим і рухомим відбивачем. Програмне забезпечення приладів серії Red передбачає введення кута нахилу лінії, метеорологічної поправки, визначення перевищень кінців ліній, координат відбивача, а також відхилення його від проектного положення.

У світловіддалемірі Red 1 передавальна і приймальна оптичні системи розділені. Потужність відбитого сигналу регулює оператор. Радіус дії Red 1 складає 3 км. У віддалемірі Red 2 приймальна і передавальна системи суміщені. Силу відбитого сигналу регулює оператор за показами індикатора і звуковим сигналом. В міні-ЕОМ за допомогою клавіатури можна вводити кут нахилу лінії та метеорологічні дані. Існують інші варіанти другої моделі віддалемірів Red 2A та Red 2L з радіусом дії 4,5 км та 9,8 км відповідно, в які вбудовано передавач вертикального кута, тому відразу можна без введення вертикального кута отримати горизонтальну проекцію лінії та перевищення її кінців. Точність цих моделей світловіддалемірів становить $5 \text{ мм} + 3 \cdot 10^{-6} L$. За допомогою віддалеміра Red 3 можна визначати висоти пунктів на підвісних конструкціях, де неможливо встановити відбивач. [26].

Контрольні запитання

1. В чому суть запитного та беззапитного методу?
2. Яка фізична суть усіх методів вимірювання?
3. Що таке часовий метод?
4. Що таке спосіб фіксованих частот?
5. Де використовують спосіб плавної зміни частот модуляції?
6. Які існують типи світловіддалемірів згідно з Державним стандартом?
7. З яких основних вузлів складаються фазові віддалеміри?
8. В залежності від якого пристрою світловіддалеміри поділяють на покоління?
9. Чим характеризуються світловіддалеміри першого покоління?
10. Які особливості світловіддалемірів другого покоління?
11. Які переваги у світловіддалемірів третього покоління?
12. Перелічіть відомі фірми-виробники світловіддалемірів.

Лекція 6. Електронні вимірювання кутів

Електронні теодоліти. Теодоліт – як відомо, це прилад, який призначено для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів. Ще тридцять років тому повсюдно домінував термін “оптичні теодоліти”. Від теодолітів з металевими кругами вони насамперед відрізнялися тим, що були устатковані скляними кругами. Теодоліти з металевими кругами повністю поступилися оптичним ще 40-50 років тому. Сьогодні вище зазначений термін вживається для того, щоб відрізнити їх від електронних і лазерних теодолітів. Проте всі три різновиди теодолітів, оптичні, електронні та лазерні, мають певні спільні ознаки, які притаманні лише цим приладам.

В кінці 50-х рр. розвиток оптичних теодолітів досягнув високого рівня, приладова точність досягнула рівня 0,2". Проте точність вимірювання кутів визначається не приладовою точністю теодоліта, а впливом атмосфери. Тому стимулів для подальшого розвитку цього різновиду теодолітів не стало. Ера комп'ютерних технологій, впровадження автоматизаційних процесів в геодезичне виробництво, які стали безумовною вимогою часу, і тому сприяли виникненню і розвитку електронних теодолітів з метою підвищення продуктивності геодезичних робіт [3].

Випуск електронних теодолітів почався порівняно недавно — на початку дев'яностих років минулого сторіччя. Першою фірмою, що опанувала випуск нової продукції, була Wild.

Автоматизація лінійних вимірювань відбулася найшвидше. Автоматизувати кутові вимірювання було важче. Спочатку мала місце тільки часткова автоматизація. Сюди слід віднести заміну рівня компенсатором, застосування фотореєстрації відліків з кругів теодоліта.

Основними частинами є горизонтальний і вертикальний круги, зорова труба, яка обертається навколо своєї власної осі, а також довкола вертикальної осі, пристрої для відлічування кругів, приведення вертикальної осі в прямовисний стан та центрування приладу над точкою. Для виготовлення високоякісних приладів використовують міцні метали, стійкі до механічного зношування, а також до фізичних і хімічних впливів. Зокрема, вони повинні мати якомога менші та взаємно скомпенсовані коефіцієнти температурного розширення, щоб зменшити можливі деформації деталей приладу. Щоб запобігти згубному впливу хімічних реагентів, застосовують метали, які не схильні до корозії.

Намагаються використовувати сплави легких металів, щоб зменшити масу приладу.

Конструкції сучасних теодолітів характерні такими основними особливостями:

- Компактність і мала вага, які полегшують транспортування, встановлення та обслуговування приладів;
- Захищеність основних частин приладу від забруднення, вологи, пилу та механічних пошкоджень;
- Зручне розташування сегментів керування (закріплених та навідних гвинтів, рівнів, відлікових пристроїв, пультів керування, дисплеїв тощо), що дає змогу спостерігачу виконувати всі операції (приведення приладу в робочий стан, контролю рівнів, відлічування, зчитування інформації), не змінюючи свого положення щодо приладу;
- Надійність приладу, тобто можливість експлуатувати його, не виконуючи додаткових юстувань, навіть після тривалої роботи з ним у важких умовах;
- Устаткування приладу оптикою, значною мірою позбавленою недоліків, притаманних оптичним системам (хроматична та сферична аберації, дисторсія тощо);
- Точність, що відповідає призначенню приладу і дає змогу використовувати його з найбільшою ефективністю.

Згідно з ДЕСТ оптичні теодоліти поділяють на високоточні, в яких середня квадратична похибка вимірювання горизонтального кута одним прийомом $m_{\beta} \leq 1''$ (ТО5, Т1, ОТ-02, Т2 (Leica), ДКМ-3, Т-3 тощо); точні $m_{\beta} \leq 10''$ (типу Т2 – 3Т2КП, 2Т2, 2Т2А, типу Т5 – 3Т5КП, 2Т5К; Theo 20 (Carl Zeiss Jena), Theo 010В, Т1 (Leica) тощо); технічні $m_{\beta} \geq 10''$ (типу ТЗО – 2ТЗОП, 4ТЗОП, 4Т15П, Theo 080 тощо). Лазерні та електронні теодоліти зазвичай бувають точні та високоточні. Зорові труби теодолітів обладнують оптичними візирами.

Деякі електронні теодоліти мають автоматизовані пристрої пошуку цілі. Практично всі теодоліти (крім ТЗО і 2ТЗО, Theo 080) устатковані оптичними центрами. Теодоліти ТЗО і 2ТЗО, Theo 080 можна центрувати зоровою трубою, якщо вона встановлена у надир.

Конструкцію сіток ниток зорових труб оптичних теодолітів подано на рис. 4.1.

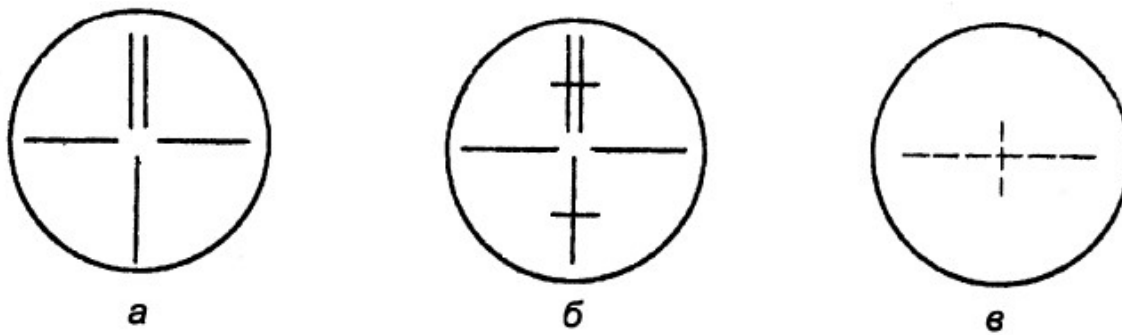


Рис. 4.1. Типи сітки ниток теодолітів:
a – високоточні теодоліти; *б* – точні та технічні теодоліти;
в – автоколімаційні прилади

Коефіцієнт ниткового віддалеміра сітки ниток типу, зображеного на рис. 6.1,б, дорівнює $100 \pm 0,5$ %, асиметрія віддалемірних ниток не повинна перебільшувати 0,2 %. Зорові труби формують пряме або обернене зображення візирної цілі.

Високоточні та точні оптичні теодоліти устатковують двосторонніми пристроями відлічування кругів. Зазвичай це двосторонні оптичні мікрометри з оптичними клинами або плоскопаралельними платівками. Технічні та деякі точні теодоліти (типу Т5, Theo 020) мають односторонні відлікові пристрої — шкалові мікроскопи, а деякі технічні (ТЗО, Theo 080) — штрихові мікроскопи.

В усіх випадках відлічують одним відліковим мікроскопом, окуляр якого розташований поруч з окуляром зорової труби. Цим мікроскопом звичайно відлічують обидва круги. Всі теодоліти устатковують електроосвітленням. В електронних теодолітах застосовують кодову систему відлічування [26].

Електронний теодоліт — це теодоліт, в якому проводиться автоматичне зчитування кутових величин з перетворенням їх в електричні сигнали. Ця операція здійснюється за допомогою аналого-цифрових перетворювачів (АЦП). В електронних теодолітах застосовуються два основні види АЦП, які відрізняються методом отримання інформації про кут у вигляді електричних сигналів. Ці два методи отримали назву кодового і інкрементального; останній часто називають просто цифровими.

По суті початком процесу автоматизації кутових вимірювань стала заміна традиційних кругів — кругами з нанесеною кодовою системою, з яких зчитування напрямків виконували спеціальні електронні пристрої, названі зчитувачами. Кодовий круг під час вимірювань непорушний, а

зчитувач — жорстко зв'язаний з трубою теодоліта і переміщається під час обертання труби відносно кодового круга. Напрямки, які змінюються плавно, перетворюються в сигнали, що змінюються дискретно. Таким чином під час застосування кодових кругів відбуваються дві операції: квантування напрямків та їх кодування.

Кодовий метод. Для цього методу лімба, з якого зчитується кутова величина, є скляним диском, на якому нанесена система концентричних кодових доріжок, що складаються з окремих елементів типу "так – ні" (наприклад, прозорих і непрозорих ділянок), що забезпечують можливість створення сигналів 1 і 0 в двійковій системі під час прочитування. Розташування цих елементів таке, що вони в певному коді зашифровують підлягаючу вимірюванню кутову величину, причому кожна доріжка звичайно відповідає певному розряду в значенні кутової величини, що вимірюється. Кількість доріжок і послідовність розташування елементів в них залежать від вибраного коду і бажаної точності отримання кута. Як код можуть використовуватися різні числові коди – двійковий, двійково-десятковий, циклічний і ін. На рис. 4.2 показаний вид кодованого круга в електронному теодоліті, що є складовою частиною одного з електронних тахеометрів фірми "НР" (США).

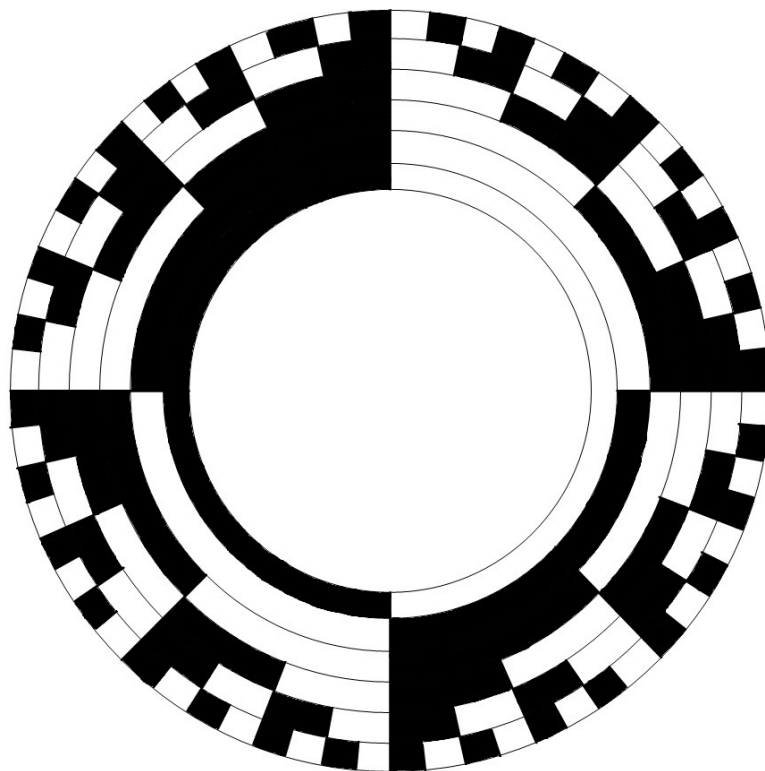


Рис. 4.2. Схема круга з двійковим кодом

Кодовий метод є абсолютним методом, тобто таким, для якого значення кутового напрямку (певному кутовому положенню кодового диска)однозначно відповідає певний кодований вихідний сигнал. Для прочитування інформації з кодових дисків використовується, як правило, оптичний (фотоелектричний) спосіб: кодовий диск просвічується світловим пучком, який потім поступає на фотоприймальний пристрій, наприклад, на матрицю фотодіодів, що дає можливість отримати на виході різні комбінації електричних сигналів під час зміни кутового положення кодового диска. Таким чином, кожна комбінація відповідає певному значенню кутового напрямку; далі електричні сигнали поступають в логічні схеми обробки, що здійснюють декодування і відтворення величини, що вимірюється, в цифровому вигляді на табло.

Розглянемо для прикладу найпростішу кодову систему – двійкову. Вона передбачає нанесення на круг системи концентричних кілець, які називаються доріжками. Кожне з цих кілець поділене на 2ⁿ поперемінно прозорих і непрозорих сегментів, де n=1, 2, 3...є номером доріжки. Нумерація починається від доріжки найближчої до центра круга. Отже, найближча до центру доріжка є поділена на 2 сегменти, один з яких є непрозорим, а другий прозорим. Друга доріжка поділена на 4 сегменти (два прозорих і два непрозорих), третя – на 8 і т. д. (рис.6.1). На доріжку, яка є на краю круга, нанесено найбільше сегментів. Один сегмент цього кільця є елементом квантування напрямку.

Нанесена таким чином система кодів для кожного положення труби теодоліта створює на радіальному напрямку кодового круга набір прозорих і непрозорих сегментів в неповторному порядку, тобто код. Всім напрямкам, які змінюються в межах одного елемента квантування, відповідає однаковий код. Тому описані доріжки дають можливість однозначно визначити будь-яке положення труби теодоліта, тобто напрямок з точністю, яка дорівнює кутовій ціні елемента квантування. Кутовою ціною елемента квантування є центральний кут, сторони якого вирізують один сегмент на останній доріжці. Тому точність визначення напрямку обумовлюються кількістю доріжок в кодовій системі, бо від неї залежить кількість сегментів на останній доріжці.

В кодовій системі кути звичайно визначають не в градусах, а в градах. Якщо на крузі є 12 доріжок, то на останній з них є $2^{12}=4096$ сегментів. Один сегмент відповідає кутові рівному 5,27' або 9,766° (1 сантиград дорівнює 0,01 града). Щоби ціна одного сегмента

була біля $1''$ (0,0001 града), тобто 0,324", потрібно мати 22 доріжки. Діаметри кругів теодоліта бувають розміром від 130 до 150 мм. Для таких розмірів кругів лінійні розміри сегмента на двадцять другій доріжці дорівнювали б біля 0,1 мікрметра. Виходячи з технологічних можливостей розмір сегмента не може бути меншим від 3 мкм. Отже, такої великої кількості доріжок практично не буває. В існуючих теодолітах кількість доріжок не перевищує 12. Для отримання значень напрямків з більшою точністю ніж $10''$ (5,27'), використовують різні способи електронної інтерполяції.

Зчитувач складається з окремих елементів, розміщених вздовж радіального напрямку круга. Число окремих елементів зчитувача дорівнює числу доріжок на крузі. На рис. 4.3. показана схема зчитувача, який складається з шести елементів. Такий зчитувач можна використовувати для зчитування напрямків з круга, бо на ньому є шість доріжок. Один елемент зчитування складається з світлодіода і фотодіода, розташованих по різні сторони відповідної доріжки круга. У разі вимірювання випромінювання світлодіодів проходить через щілинну діафрагму, з допомогою якої утворюється “площина зі світла”.

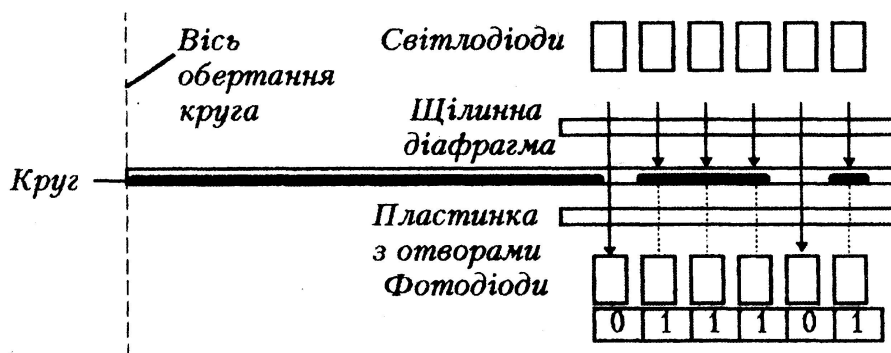


Рис. 4.3. Зчитувач з кодового круга

Товщина цієї площини не більша від ширини сегмента на крайній доріжці, тобто є меншою від одного елемента квантування. На шляху випромінювання знаходиться круг з кодовими доріжками та пластина з отворами, розміщеними точно під доріжками. Коли випромінювання потрапляє на непрозорий сегмент, то воно ним гаситься. Коли ж сегмент прозорий, то випромінювання проходить крізь нього і отвір в пластинці та потрапляє на фотодіод, з якого отримуємо електричний струм. Таким

чином одержуємо визначник напрямку в двійковому коді, тобто своєрідний “електронний відлік”. У ньому прийнято, що наявність струму відповідає нулеві, а його відсутність – одиниці. На рис. 4.3. прозорі і непрозорі сегменти на доріжках розміщені так, що отримуємо код 011101.

Недоліком системи є невизначеність зчитування на межі прозорого і непрозорого сегментів, яка виникає внаслідок того що площа світла має конечну товщину. Тому у разі пересування межі прозорого і непрозорого сегментів відбувається поступова зміна інтенсивності світла [14].

Інкрементальний метод. Він заснований на використуванні штрихового растру — системи радіальних штрихів, що наносяться звичайно на зовнішньому краю лімба або алідади через однакові інтервали. Густина растру може бути дуже високою (до сотень штрихів на 1мм) що забезпечує високу точність вимірювань. Непрозорі штрихи і прозорі інтервали між ними (звичайно рівні товщині штрихів) утворюють послідовність елементів "так – ні", які в цьому випадку називають інкрементами (від англ. increment – нескінченно малий приріст). Кут повороту такого растрового круга може бути оцінений по кількості інкрементів, що пройшли через фіксовану точку. Зчитування проводиться також оптичним методом і кількість пройдених інкрементів виражається числом імпульсів світла, що поступили на фотоприймач.

Для забезпечення реверсивного рахунку імпульсів, тобто відліку з урахуванням напрямку обертання круга, застосовуються два фотоприймачі (фотодіода), що сприймають імпульсні сигнали, зсунуті по фазі на 90° . Цього може бути досягнуто або відповідним розміщенням фотодіодів щодо растру, або застосуванням двох однакових растрових послідовностей, зсунутих на $1/4$ інкремента. Принципи зчитування кутів по горизонтальному і вертикальному кругам ідентичні.

Роздільну здатність фотоелектричних перетворювачів підвищують, застосовуючи замість кодових масок растри (рис. 4.4). Растр – це доріжка з прозорих і непрозорих роздільно розташованих штрихів однакової ширини, яка нанесена на край круга. Прозорий і непрозорий сусідні штрихи є елементом квантування круга, який у кутовій мірі є центральним кругом цих двох штрихів. Власне зчитувач складається із світло діода 1, маски 2 і фотодіода 3.

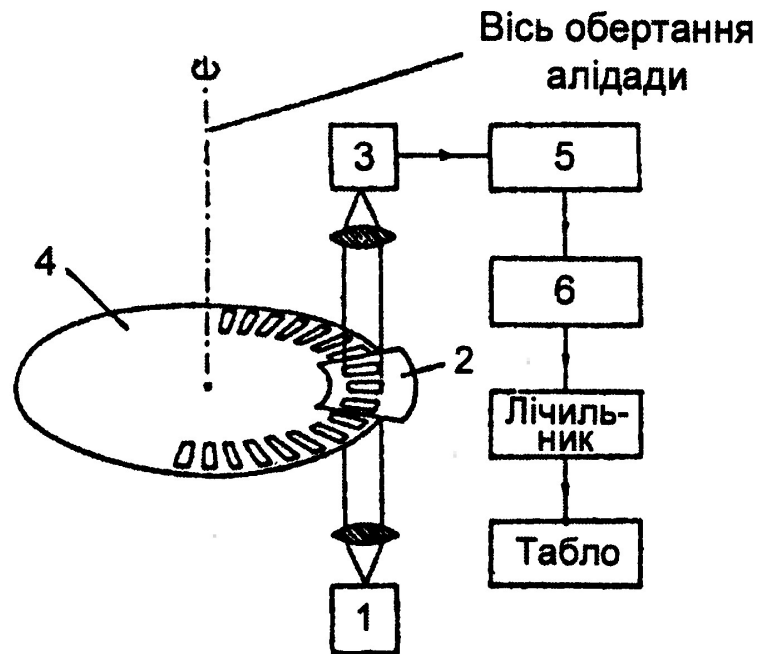


Рис. 4.4. Схема імпульсної системи відлічування круга:
 1 – світлодіод; 2 – маска; 3 – фотодіод; 4 – круг із шкалою у вигляді растра; 5 – підсилювачі; 6 – формувач імпульсів

На масці нанесено фрагмент растра круга 4, що має 100 елементів квантування. Маска встановлена так, що її растр розташований точно над растром круга. Коли прозорі штрихи маски та круга збігаються, то на фотодіод потрапляє менша частина випромінювання. Коли непрозорі штрихи круга встановлюються навпроти прозорих штрихів маски, випромінювання на фотодіод не потрапляє.

Під час обертання круга на фотодіод потрапляє випромінювання, що є модульованим практично за гармонійним законом. За тим самим законом змінюється сила струму на виході з світлодіода. Період зміни сили струму відповідає повороту круга на один елемент квантування. Струм з фотодіода підсилюється підсилювачем 5 і подається на формувач імпульсів 6, в якому формуються короткочасні імпульси кожного періоду коливаль. Кількість імпульсів, а, власне, на скільки елементів квантування повернувся круг, фіксує лічильник. На табло висвітлюється величина виміряного кута в кутових одиницях.

Щоб розрізнити напрямок обертання круга, на нього наносять дві растрові доріжки, зміщені одна відносно одної на половину товщини штриха. Зчитувач має два фотодіоди відповідно. У результаті

одержують два імпульсні сигнали, зміщені один відносно одного на чверть періоду. Знак зміщення визначає напрямок повороту круга.

Щоби визначити дробову частку елемента квантування, використовують електронні мікрометри різноманітної конструкції. Наприклад, він може складатися із оптичного клина, на якому нанесено відрізок кодових доріжок, який відповідає, наприклад, 1° (града) і має 1000 поділок. Під час точного наведення зорової труби навідним гвинтом клин також переміщується на віддаль, пропорційну до дробової частки 1° . Зображення доріжок, збільшене оптичною системою, проектується на фотодіоди зчитувача. Дешифровані сигнали з фотодіода дають можливість оцінювати дробові частки града.

Імпульсну систему відлічування використовують у сучасних електронних теодолітах, наприклад, Eth3 і Eth4 (Carl Zeiss), ETL1 (Topcon, Японія).

Крім імпульсної, сьогодні застосовують динамічну систему відлічування та визначення кутових величин (рис. 4.5.).

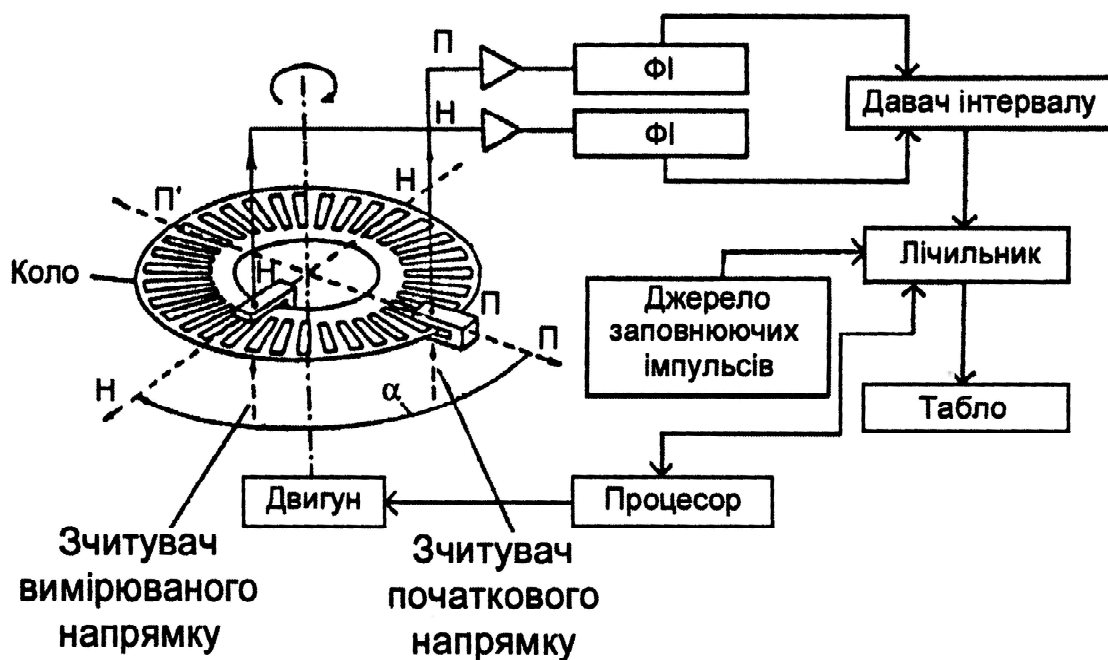


Рис. 4.5. Схема динамічної системи відлічування та визначення напрямків

Як і для імпульсної, для динамічної системи застосовано поділ круга растровою доріжкою з таким самим елементом квантування. Під час вимірювань двигун рівномірно обертає круг, внаслідок чого на фотодіод зчитувача потрапляє модульоване випромінювання світлодіода. Період модуляції відповідає повороту круга на один

елемент квантування. Динамічна система має два зчитувачі: початкового ($P'-P$) і вимірювального ($H-H$) напрямку. Сила струму на виході з кожного фотодіода змінюється з однаковою частотою згідно із гармонійним законом. Струм з фотодіодів потрапляє на цифровий фазометр, який дає можливість з великою точністю визначити дробову частку квантування різниці початкового і вимірюваного напрямків. Щоб визначити кількість цілих елементів квантування різниці напрямків, на круг наносять додатково відмітки. Застосування інтегровального цифрового фазометра дає змогу у теодоліті, наприклад, Т 2000 (Leica, Швейцарія), вимірювати кути з точністю не гірше, ніж $1''$ [26].

Одним з можливих варіантів є використання відображуючого растра, в якому інтервали між штрихами не пропускають, а відбивають світло. Принцип системи відрахування в цьому випадку, використаний, наприклад, у високоточних теодолітах Теомат і тахеометрах Тахимат швейцарської фірми “Wild”, ілюструється на рис. 4.6.

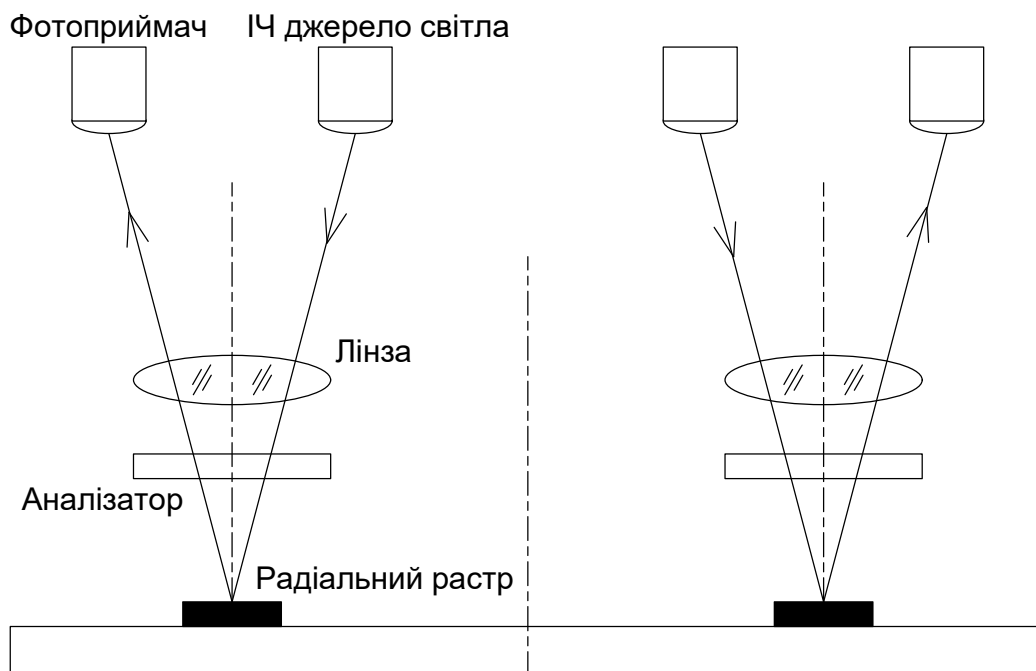


Рис. 4.6. Принцип прочитування у разі використання відображаючого растра

У реальних системах має місце не імпульсне, а приблизно синусоїдальна зміна інтенсивності світла на фотоприймачах під час обертання растрового круга, і імпульси формуються з одержуваних на виході фотоприймачів сигналів відомими електронними способами. Інкрементальний метод є відносним методом, для якого визначаються тільки зміни кутового положення круга, тобто вимірюються кути, тоді як

для кодового методу вимірюються напрями, а кути обчислюються як різниці напрямів. Як для кодового, так і для інкрементального методу для підвищення точності прочитування кутів застосовуються інтерполятори – системи, що містять декілька, розташованих певним чином по відношенню до кутового круга пар фотодіодів, сигнали від яких зсунуті по 45 фазі на певну величину; ці сигнали обробляються спільно, що дає можливість отримати високий кутовий дозвіл. Прикладом інтерполятора може служити система, зображена на рис. 6.3; тут аналізатор, на якому також нанесені штрихи, грає роль дифракційних решіток, що дають змогу отримати в площині зображення 4 пучки і використати 4 фотоприймачі, розташовані таким чином, що вони у разі обертання круга створюють чотири електричні сигнали, зсунуті по фазі щодо один одного на 90° . За допомогою їх складання і віднімання утворюються ще 4 сигнали, і всі ці сигнали обробляються спільно. В сучасних електронних теодолітах точність вимірювання кутів може бути дуже високою, досягаючи 0,5" [8, 10, 11, 26].

Електронному теодоліту притаманні всі ознаки теодоліта як приладу для вимірювання горизонтальних та вертикальних кутів. Конструкції електронних та оптичних теодолітів мають багато спільного. Принаймні механічні вузли електронних теодолітів, а саме: осьові системи, закріпні та навідні пристрої, а також рівні та компенсатори можуть бути конструктивно традиційними або мати деякі відмінності. Разом з тим, електронні теодоліти обладнані автоматизованою системою відлічування кругів під час визначення кутів та напрямків на відміну від своїх попередників – оптичних теодолітів, що мають візуальну систему відлічування. На кругах електронних теодолітів нанесено не традиційні для оптичних теодолітів колові шкали з поділками, а кодові або растрові шкали. Для їхнього відлічування в електронних теодолітах встановлені фотоелектричні пристрої, електронні зчитувачі, процесори, засоби нанесення, опрацювання та передавання інформації, а також її відтворення. В електронних теодолітах кути, зазвичай, вимірюють у гонах (1 гон дорівнює $1/400$ частці кола). Зважаючи на вимоги ДЕСТ до оптичних приладів, електронні теодоліти за точністю здебільшого можна охарактеризувати як точні та високоточні. На рис. 4.7 подано точний електронний теодоліт 2Т5Е, сконструйований на базі точного оптичного теодоліта типу 3Т5КП.



Рис. 4.7. Точний електронний теодоліт 2Т5Е:
1 – підставки; 2 – дисплейна панель керування; 3 – навідний та закріпний гвинти аліади; 4 – навідний та закріпний гвинти зорової труби; 5 – зорова труба

Конструкція механічних вузлів та спряжень теодоліта 2Т5Е за своїми характеристиками не відрізняється від аналогічних згаданого оптичного теодоліта. Як і 3Т5КП, електронний теодоліт 2Т5Е слугує для вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів (зенітних віддалей) у теодолітних ходах, для розмічування планових і висотних знімальних мереж, геодезичних мереж згущення, виконання вишукувальних та інженерно-геодезичних робіт тощо.

Результати вимірювань можна заносити до внутрішньої пам'яті і передавати до персонального комп'ютера через інтерфейс RS-232C. Деякі технічні дані 2Т5Е наведено у табл. 4.1.

Електронні теодоліти такого самого класу точності випускають відомі у світі фірми, наприклад, ДТ 102 (Topcon, Японія), ETh 50 (Trimble-Zeiss), Leica, Kern та інші. У табл. 4.2 з метою порівняння наведено технічні дані теодолітів ETh 50 і ДТ 102.

Таблиця 4.1

Технічна характеристика теодоліта 2Т5Е

Характеристика	Значення характеристики
Середня квадратична похибка вимірювання одним прийомом	
горизонтального кута	5" (1,5 мгон)
вертикального кута	5" (1,5 мгон)
Діапазон вимірів:	
зенітної віддалі	Від 45° до 135°(+50...150 гон)
вертикального кута	Від +45° до -45° (+50...-50 гон)
Збільшення зорової труби, крат	30 ^x
Межа роздільної здатності	3,24"
Кут поля зору	1°30'
Межі візування	Від 1,5 м до ∞
Джерело живлення:	
напруга, В	Від 6,5 до 8,56
ємність	1,6 А год
час заряджання	1,5 год
Межі робочих температур	-20°C до +50°C
Маса (із джерелом живлення)	4,5 кг

Таблиця 4.2

Технічна характеристика теодолітів ЕТh 50 і ДТ 102

Характеристика	ЕТh 50	ДТ 102
Середня квадратична похибка вимірювання горизонтального та вертикального кута одним прийомом	2,0мгон/6"	1,5мгон/5"
Збільшення зорової труби, крат	26 ^x	30 ^x
Світловий діаметр об'єктива, мм	40	45
Довжина зорової труби, мм	195	145
Межа роздільної здатності	-	2,5"
Найменша віддаль візування, м	0,8	0,9
Межі дії компенсатора вертикальної осі	-	±3'
Панель дисплея	Одностороння	Одностороння
Рівні, точність:		
рівень аліади горизонтального круга	30"	40"
сферичний рівень	10'	10'
рівень на зоровій трубі	30"	-
Джерело живлення:		
тип	N111 акумулятор	Сухі батареї
ємність	1 А год	
напруга	6В	6В
Час безперервної роботи, год	25	24
Маса (з джерелом живлення), кг	3,5	4,1

За характеристикою фірми-виробника теодоліт ETh 50 (рис. 4.8) надійний, простий та зручний і рекомендований для виконання інженерно-геодезичних робіт, зокрема, у будівництві.



Рис. 4.8. Точний електронний теодоліт ETh 50

Він устаткований електронним відлічуванням кутів з безперервною цифровою індикацією на чотирирядковому дисплеї. Керування всіма вимірювальними функціями виконують сімма кнопками. Похибка нахилу осі обертання зорової труби, колімаційна похибка компенсуються автоматично. Так само автоматично приводиться місце нуля вертикального круга до нуля. У накопичувачі пам'яті теодоліта закладено програми для переведення вертикальних кутів до значень кутів нахилу у відсотках, і навпаки; встановлення початкового (нульового) горизонтального напрямку; розмічування прямих кутів; виконання операцій центрування та провішування. Крім того, є можливість задавати напрямки під час кутових вимірювань, вибирати точність відлічування і нульовий напрямок під час вимірювання вертикальних кутів. У разі необхідності ETh 50 можна виконувати нескладні роботи з нівелювання, для чого він може бути обладнаний рівнем на зоровій трубі.

Теодоліт ДТ 102, як і ETh 50, устаткований двосторонньою динамічною системою відлічування горизонтального круга, має два однакові пульти керування, розташовані з діаметрально протилежних боків горизонтального круга, а також рідинний компенсатор вертикальної осі. За програмним забезпеченням він не поступається теодоліту ETh 50. Фірма-виробник, як одну з переваг ДТ 102, виділяє його волого водостійкість.

Електронні теодоліти серії 100 (T105, TI 10) як новітню серію теодолітів такого класу пропонує фірма Leica. Середня квадратична похибка вимірювання кутів, наприклад, теодолітом T105, становить 5". Прилади обладнані електронними компенсаторами прямолинійності вертикальної осі, а також компенсаторами вертикального круга. Фірма рекомендує теодоліти серії 100 як прості, зручні та надійні в експлуатації. Для потреб будівництва ця сама фірма випускає теодоліти серії BUILDER T100 і T200, що мають середню квадратичну похибку вимірювання 9" і 6" відповідно.

Високоточні електронні теодоліти однією з перших розпочала виготовляти фірма Wild. На рис. 4.9 зображено електронний теодоліт фірми Wild T2000S з серії T2000.



Рис. 4.9. Високоточний електронний теодоліт T2000S:
1 – дисплейна панель керування; 2 – табло результатів вимірювань;
3 – зорова труба; 4 – навідний та закріпний гвинти аліади
горизонтального круга; 5 – підставка

Зорова труба теодоліта, що має світловий діаметр об'єктива 52 мм, а збільшення $43^{\times}$ (може бути $26^{\times}$, $35^{\times}$, $59^{\times}$) будує пряме зображення візирної цілі. У теодоліті передбачено два режими вимірювання кутів: традиційний з наведенням на нерухомі цілі (середня квадратична похибка вимірювання кута одним прийомом $0,5''$ без урахування атмосферних впливів) та режим відстеження для наведення приладу на рухомі цілі. Діапазон робочої температури від -20°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Теодоліт обладнано компенсатором вертикального круга. У відліки горизонтального круга автоматично вводять поправки за ексцентриситет алідади, колімаційну похибку та за нахил осі обертання зорової труби. Відлічувати можна як у градусній мірі, так і в гонах. На теодоліті встановлено дисплейну панель керування, до якої під'єднують реєстратор. На екран дисплея можна вивести значення вимірюваних горизонтальних кутів та зенітних віддалей. У пам'ять реєстратора можна ввести результати вимірювань, час спостережень, номер пункту, який спостерігають, його координати та позначку, віддалі до пунктів. Опрацювання результатів та врівноваження вимірювань виконує комп'ютер, до якого під'єднують реєстратор. Теодоліт має індивідуальне живлення від батарей. Без підзаряджання батарей теодоліта можна виконати 1500 кутових вимірювань. Із джерелом живлення прилад важить 10,5 кг.

Подальшим вдосконаленням високоточних електронних теодолітів стало обладнання їх двома однаковими пультами керування, розташованими на діаметрально протилежних ділянках горизонтального круга. В один із пультів керування вставляють замінну електронну дискету для записування результатів вимірювань. Останні моделі високоточних теодолітів фірм Leica, Trimble-Zeiss, Topcon, Sokkia устатковані рідинними компенсаторами нахилу вертикальної осі теодоліта здебільшого у межах $\pm 3'$. Вертикальну вісь приладу встановлюють приблизно прямовисно за допомогою сферичного та циліндричного рівнів, а точно ($0,1...0,3''$), користуючись показами рідинного компенсатора. У сучасних електронних теодолітах зазвичай застосовують двосторонню динамічну систему визначення (відлічування) напрямків.

У теодоліті T3000 фірми Leica використана панфокальна зорова труба. Із зменшенням віддалі до цілі у зоровій трубі збільшується поле зору, зокрема із зменшенням віддалі до цілі від нескінченності до

мінімальної віддалі візування – 0,6 м, кут поля зору збільшується від $1^{\circ}10'$ ($1,3^{\circ}$) до $3^{\circ}47'$ ($4,29^{\circ}$). У програмному забезпеченні приладу передбачена можливість багаторазового вимірювання кута (до дев'яти прийомів), усереднення результатів вимірювання, обчислення середньої квадратичної похибки вимірювання кута, занесення результатів вимірювань та обчислень до пам'яті носія інформації. У разі необхідності інформація відтворюється на екрані дисплея. Теодоліт обладнаний пристроєм для примусового центрування.

Високоточний електронний теодоліт Eth 2 (Trimble-Zeiss) (рис. 4.10) призначений для вимірювання кутів у тріангуляції, виконання геодезичних вимірювань деформацій промислових споруд та обладнання. Деякі технічні дані приладу подано у табл. 4.3.

Фірма-виробник підкреслює якості теодоліта Eth 2, які є загалом характерними для приладів такого класу. Діаметрально протилежне, двостороннє розташування системи відлічування кругів. Устаткування теодоліта двоосьовим компенсатором встановлення вертикальної осі. Автоматичне компенсування похибок нахилу осі обертання зорової труби, колімаційної похибки та приведення місця зеніта. Наявність вбудованого інтерфейсу для зберігання результатів вимірювань та опрацювання їх.

Комбінація теодоліта Eth 2 з віддалеміром Eldi 10 (Trimble-Zeiss) дає змогу виконувати кутові та лінійні вимірювання, використовуючи програми для електронних тахеометрів. Комбінація двох електронних теодолітів Eth 2, об'єднаних в одну систему спільним комп'ютером, монітором та іншим устаткуванням, дає змогу здійснювати високоточні інженерно-геодезичні вимірювання під час встановлення, монтажу та складання великогабаритного обладнання та машин, як, наприклад, у літако- та суднобудуванні, ракетобудуванні, монтажі обладнання пришвидшувачів електронних частинок та антен радіотелескопів тощо.

Необхідно зауважити, що дві останні з перерахованих якостей теодоліта Eth 2 притаманні сучасним високоточним електронним теодолітам, які випускають також фірми Leica, Sokkia та інші. Для виконання високоточних інженерно-геодезичних вимірювань теодоліти встановлюють на невеликій віддалі між собою на жорстко закріплених пунктах, планові координат та висоти яких відомі. Необхідне примусове центрування теодолітів на пунктах, точність вимірювання кутів має бути не гіршою від $0,6''$.

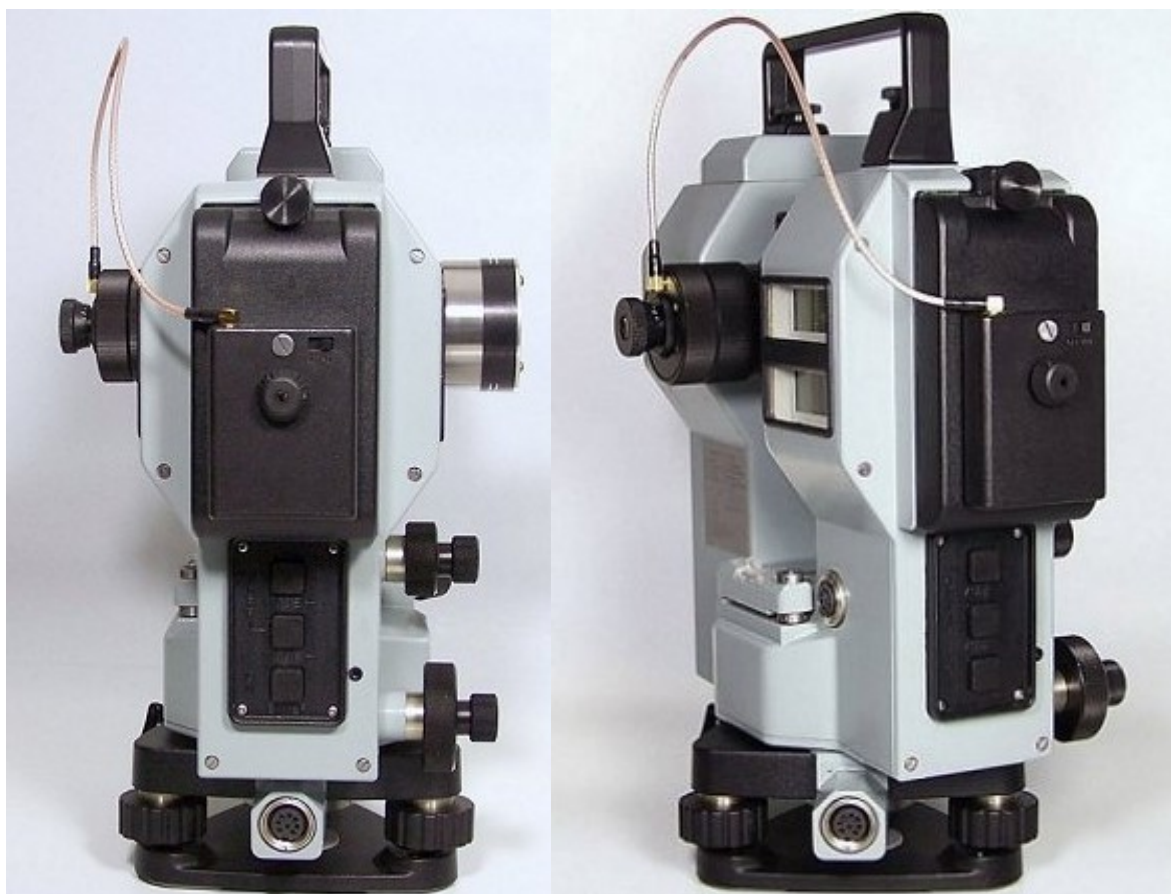


Рис. 4.10. Високоточний електронний теодоліт ETh 2

Таблиця 4.3

Технічна характеристика теодоліта ETh 2

Характеристика	Значення
Середня квадратична похибка вимірювання горизонтального та вертикального круга одним прийомом	0,2 мгон/0,5"
Збільшення зорової труби, крат	30 ^x
Світловий діаметр об'єктива, мм	45
Довжина зорової труби, мм	170
Найменша віддаль візування, м	1,0
Межі дії двоосьового рідинного компенсатора вертикальної осі	±3'
Панель дисплея	Двостороння
Рівні, точність:	
рівень аліади горизонтального круга	30"
сферичний рівень	10'
Джерело живлення:	
тип	NiCd батарея
ємність	1,8 А год
напруга	4,8 В
Час безперервної роботи, год	8,0
Маса (з джерелом живлення), кг	4,7

Деякі сучасні моделі високоточних теодолітів, наприклад, ТМ 3000 (рис. 4.11, табл. 4.4) фірми Leica устатковані автоматизованою системою наведення зорової труби на ціль, причому технічні характеристики названої моделі лишилися такими самими, що й базової Т 3000. Зорова труба теодоліта ТМ 3000 за допомогою серводвигунів автоматично орієнтується за заданим напрямком. У пам'ять теодоліта вводять значення потрібного горизонтального і вертикального кутів. Вони слугують вихідними даними для обчислення кута нахилу зорової труби та кута, на який потрібно повернути алідаду. Серводвигуни з швидкістю 50° на секунду обертають на обчислені кути одночасно алідаду і зорову трубу. Під час винесення проекту в натуру після встановлення приладу над вихідним пунктом і приведення його у робоче положення наводять зорову трубу на початковий напрямок, вводять у пам'ять заданий напрямок і натискають відповідну клавішу пульта керування. Під час вимірювання кутів способом кругових прийомів у першому півприйомі наводять трубу на всі пункти, які спостерігають, і вводять у пам'ять значення виміряних кутів. Після переведення зорової труби через зеніт, у другому півприйомі серводвигуни почергово грубо наводять теодоліт на відповідні цілі. Точне наведення виконує спостерігач. Відлічування, введення у пам'ять результатів вимірювань, а також їхнє виведення на дисплей виконується автоматично.

Необхідно зауважити, що ТМ 3000 не є поодиноким теодолітом, що устаткований автоматизованою системою наведення. Фірма Leica виготовляє також теодоліти ТМ 1100, ТМ 1800, що обладнані такими системами. Загалом літера М у назві теодоліта означає, що він "моторизований", тобто обладнаний автоматизованою системою наведення.

Деякі останні моделі високоточних електронних теодолітів фірми Leica із самонаведенням є відеотеодолітами, наприклад, ТМ 3000V. У трубі теодоліта розміщена малогабаритна відеокамера і оптична система, що проектує зображення предметів, які є у полі зору, на матрицю світлочутливих елементів відеокамери розмірами 8,8 x 6,6 мм.



Рис. 4.11. Високоточний теодоліт ТМ 3000 фірми Leica

Таблиця 4.4

Технічні характеристики теодолітів фірми Leica

Показники	T 1100	T 1800	TM 110	TM 1800
СКП горизонтальних і вертикальних кутів	1 мгон, 3"	0,3 мгон, 1"	1 мгон, 3"	0,3 мгон, 1"
Точність компенсатора, мгон	0,3	0,1	0,3	0,1
Збільшення зорової труби, крат	30 ^x	30 ^x	30 ^x	30 ^x
Мінімальна віддаль фокусування, м	1,7	1,7	1,7	1,7
Маса, кг	5,6	5,9	5,6	5,9

Зображення предметів, що є у полі зору оптичної системи, скануються і після перетворень створюється цифрова модель зображення поля зору оптичної системи. ЕОМ теодоліта аналізує цю модель, виділяє ціль, на яку має бути найдена зорова труба, і визначає її координати відносно центра матриці. За цими координатами визначають кути, на які треба повернути алідаду і трубу, і серводвигуни наводять теодоліт на ціль.

У табл. 4.5 наведено деякі технічні дані теодоліта ТМ 3000 V.

Технічна характеристика теодоліта ТМ 3000 V

Середня квадратична похибка вимірювання горизонтального та вертикального кута одним прийомом (звичайним наведенням)	0,15 mgon; 0,5"
автоматизованим наведенням	0,15 mgon; 0,5"
Швидкість автоматичного наведення	50° за секунду
Межі дії двоосьового рідинного компенсатора нахилу вертикальної осі	0,055 mgon; 3'
Похибки встановлення осі обертання теодоліта прямовисно	0,1"
Збільшення зорової труби, крат	43 ^x
Світловий діаметр об'єктива, мм	52
Найменша віддаль візування, м	1,5
Розміри матриці світлочутливих елементів відеокамери:	
мм	6,6 x 8,8
пікселі	500 x 582
Маса, кг	12,5

Треба зауважити, що більшість технічних даних теодоліта ТМ 3000 V притаманна теодолітам серії Т 3000 [26].

Контрольні запитання

1. Що таке цифровий метод?
2. Якими являються кодовий та інкрементальний методи?
3. Для чого використовується штриховий растр?
4. Де використовується зчитування кутів за допомогою оптичного проміння?
5. Що використовують в електронних теодолітах для підвищення точності?
6. Що може використовуватись в електронних тахеометрах?
7. Які величини являються вимірюваними?
8. Які з величин являються обчисленими?

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. БУДОВА ТА ПРИНЦИПИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННИХ ТАХЕОМЕТРІВ, ЕЛЕКТРОННИХ НІВЕЛІРІВ ТА ЛАЗЕРНИХ СКАНЕРІВ

Лекції 7, 8. Електронні тахеометри

Появі електронних тахеометрів передувало створення та вдосконалення електронних теодолітів і топографічних віддалемірів. Ще донедавна існували два напрямки розвитку електронних тахеометрів. Це електронно-оптичні тахеометри, в яких передбачено візуальне відлічування кутомірних кругів і автоматичне вимірювання відстаней (їх інколи називають Semi-total Station) і електронні тахеометри, що мають автоматичну реєстрацію кутових і лінійних вимірювань (Total Station). Основою останніх є електронний теодоліт. У наш час електронно-оптичні тахеометри поступилися досконалішим електронним тахеометрам. Найпростіший електронно-оптичний тахеометр є оптичним теодолітом, який обладнаний віддалемірною насадкою. Для відображення результатів вимірювань, а також їхнього опрацювання ЕОМ використовують клавіатуру віддалеміра і відповідні приставки.

З електронно-оптичних тахеометрів в Україні найвідомішими є серія ЕОТ 2000 (Carl Zeiss Jena). Деякі технічні дані тахеометрів ЕОТ 2000 подано в табл. 5.1.

Автоматизація в електронних тахеометрах і узагальнена схема їх будови. Електронним тахеометрам (Total Station) притаманна автоматична реєстрація результатів вимірювань. В електронних тахеометрах, як і в електронних теодолітах, застосовується імпульсна або динамічна система відлічування та визначення напрямків.

Основними напрямками удосконалення можливостей сучасних електронних тахеометрів є забезпечення необхідного класу точності; підвищення можливостей і точності вимірювання довжин ліній, а надто без застосування відбивачів; автоматизація вимірювань; розширення функціональних можливостей приладів удосконаленням і розширенням програмного забезпечення та інтегруванням їх, наприклад, з системами GPS. Сьогодні електронні тахеометри випускають всі відомі приладобудівні фірми: Leica (Швейцарія), Trimble-Zeiss (США-Німеччина), Geotronics (Швеція), Sokkia, Topcon, Nikon та Pentax (Японія) та ін.

Технічні дані тахеометрів ЕОТ 2000

Показники	ЕОТ 2000
Збільшення зорової труби, крат	30 ^x
Світловий діаметр об'єктива, мм	40
Середня квадратична похибка вимірювання:	
горизонтального кута	1,5"
вертикального кута	1,5"
довжини лінії	20
Діаметр круга:	
горизонтального	86
вертикального	86
Діапазон дії віддалемірної частини, м	0,2...3000
Ціна поділки циліндричного рівня алідади	30"
Компенсатор вертикального круга:	
діапазон дії	4'
похибка компенсації	3"
Час вимірювання	10
Маса, кг:	
тахеометра	10,5
блока живлення	-

Прилади, які випускають названі фірми, забезпечують різноманітні вимоги користувачів щодо точності, швидкодії, можливостей програмного забезпечення тощо. Наприклад, середня квадратична похибка вимірювання кутів електронними тахеометрами різних класів становить від 0,5" до 10", а відстані за однакових умов можуть бути виміряні майже з тією самою точністю із застосуванням відбивачів, без них або з відбиваючою плівкою.

Функції управління, контролю і обчислення здійснюються за допомогою мікропроцесора. На табло можуть видаватися похила відстань, горизонтальне прокладання, перевищення, горизонтальні і вертикальні кути або зенітні відстані по команді з пульта управління процесора. В сучасних електронних тахеометрах використовуються мікрокомп'ютери, що є поєднанням мікропроцесора з пам'яттю і пристроями введення і виведення даних. В цьому випадку дані можуть не тільки видаватися на табло, але також реєструватися в пристрої, що запам'ятовує, і можуть бути виведені на зовнішній накопичувач або зразу

ж обробляються відповідно до постійно закладених в пам'ять ("зашитих") програм, забезпечуючи безпосередньо в польових умовах одержувати координати пунктів і проводити інші спеціальні і контрольні обчислення, пов'язані з вирішенням різних геодезичних задач.

Результати цих обчислень також можуть видаватися на табло, записуватися в пам'ять і можуть бути передані на зовнішній накопичувач інформації, що підключається до приладу. Узагальнена структурна схема таких електронних тахеометрів показана на рис. 5.1.

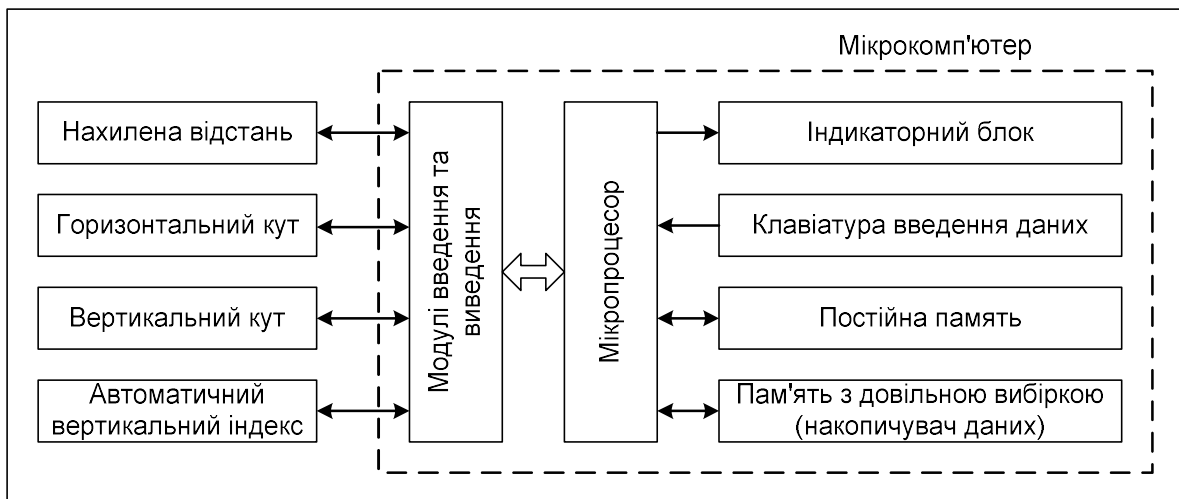


Рис. 5.1. Узагальнена структурна схема електронного тахеометра

В сучасних електронних тахеометрах табло індикаторного блоку є багатофункціональним цифровим дисплеєм на декілька рядків, на якому може відображатися різна додаткова інформація.

Зовнішній польовий накопичувач інформації, що підключається до приладу, який називають також пристроєм збору і реєстрації даних (останнім часом увійшов до побуту термін "електронний польовий журнал") є хранителем отриманої в полі інформації, яка може бути передана для подальшої обробки в камеральний обчислювальний центр. Таким чином, електронні тахеометри дають можливість створювати системи повністю автоматизованого картографування, ланками якої є: електронний тахеометр – стаціонарний комп'ютер – графічний пристрій.

Напрями розвитку електронної тахеометрії. До теперішнього часу існує дуже багато конкретних моделей електронних тахеометрів, що випускаються різними фірмами в різних країнах. Відмітимо, що в даному курсі навмисно не описуються які-небудь конкретні прилади, бо

розвиток в цій області йде такими швидкими темпами, що щороку з'являються нові моделі. Велика увага надається гібридним (модульним) конструкціям, що допускають просту і легку збірку моделей з різними можливостями. Подібні системи володіють у відомому сенсі більшою гнучкістю, ніж нероз'ємні конструкції, забезпечуючи з максимальною ефективністю використовувати геодезичні прилади, що випускаються фірмою, синтезуючи їх різним чином залежно від виду необхідних робіт. Різноманітність теодолітів і віддалемірів часто поєднується з уніфікацією комп'ютерної техніки, коли фірма випускає універсальний пристрій збору і реєстрації даних (електронний польовий журнал, він же зовнішній накопичувач), який може працювати з широкою комбінацією вимірювальних приладів.

Жорстка конкуренція примушує західні фірми вести безперервне вдосконалення своїх моделей і розробку нових приладів. Приблизно однаковими залишаються такі характеристики, як дальність дії (до декількох кілометрів) і точність (типова точність лінійних вимірювань складає $5\text{мм} + 5\text{мм/км}$, кутових – в діапазоні від 10 до $1-2''$), і основна увага розробників направлена на створення максимальних зручностей для споживача. Як приклад можна вказати, що перший прорив в цій області був здійснений в 1986 році шведською фірмою "Геотронікс" (Geotronics AB), що створила прилад "Геодиметр 400" і потім декілька подальших моделей (440, 460), які утворили нове покоління електронних тахеометрів. В геодиметрах чотирьохсотої серії, окрім режиму "трекінга" (стеження за відбивачем, що рухається, коли беруться відліки через кожні 1-3 секунди), який вже використовується в інших приладах, були вперше застосовані наступні новинки:

1) система прецизійного електронного контролю процесу кутових вимірювань, що дає можливість працювати для одного круга (положенні труби без перекладу через зеніт) без втрати точності. Ця система забезпечує:

- автоматичну корекцію колімаційної помилки і нахилу осі обертання труби;
- повне виключення вплив ексцентриситету і помилок розподілів шкали (лімба);
- автоматичну компенсацію порушень центрування інструменту в процесі роботи;

2) електронний рівень, що забезпечує автоматичну нівеляцію

приладу без обертання його навкруги вертикальної осі;

3) багатофункціональний дисплей (на рідких кристалах), що має табло з чотирма строчками по 16 розрядів в кожній; на цьому дисплеї може відображатися відразу велика кількість інформації;

4) "Юніком" – пристрій для одностороннього мовного зв'язку з реєчником по оптичному променю. На рейці з відбивачем змонтований фотоприймач; передача здійснюється шляхом модуляції голосом інфрачервоного променя, який служить джерелом випромінювання далекомірної частини приладу. Надалі оптичний зв'язок був замінений двостороннім радіозв'язком;

5) "Треклайт" – пристрій для "самонаведення" реєчника, який дає можливість йому швидко відшукати промінь від приладу і встановити в нього відбивач, змонтований на рейці. Пристрій є трибарвним джерелом видимого світла, випромінюючим біле, червоне і зелене світло; пучок білого світла знаходиться між червоним і зеленим і працює миготливими спалахами 2-3 рази в секунду. Якщо реєчник знаходиться в створі, він бачить біле світло, у разі відхилення від створу вліво – зелене, а управо – червоне. На дистанції 100м ширина зони білого світла складає 25см, а червоного і зеленого – по 5м; відхилення пучка білого світла дорівнює відхиленню інфрачервоного випромінювання від основного джерела віддалеміра. Коли біле світло потрапляє на відбивач, частота спалахів білого світла подвоюється, сигналізуючи реєчнику про правильну установку відбивача.

Удосконалення, вказані в пунктах 1) і 2), були застосовані фірмою раніше в приладі Геодиметр 142, а Треклайт і Юніком були також розроблені раніше як окремі пристрої для використання з цілим рядом більш ранніх моделей. В геодиметрах чотирьохсотї серії всі ці досягнення зібрані воедино, а багатофункціональний дисплей застосований вперше.

В ті ж роки фірмою "Wild" (Швейцарія) на основі електронного теодоліта Теомат Т 2000 був розроблений електронний тахеометр Тахимат ТС 2000, що різко виділяється надзвичайно високою точністю кутових вимірювань (0,5"), а також підвищеною точністю лінійних вимірювань (2мм + 2мм/км). Висока кутова точність досягнута застосуванням оригінальної динамічної системи оптико електронного сканування під час прочитуванн з растрового круга. Для кожного відліку використовується сканування по всьому кругу, що виключає помилки

розподілів лімба, а прочитування діаметрально протилежних штрихів растру виключає помилку за ексцентриситет. Крім того, автоматично виключається колімаційна помилка горизонтального круга і автоматично коректується помилка індексу вертикального круга. Прилад повністю автоматизований і до нього може бути підключений зовнішній накопичувач інформації.

Подальші удосконалення електронних тахеометрів йшли по шляху комп'ютеризації, розширення можливостей вбудованих програм, використання сервоприводів, систем автоматичного наведення і стеження за ціллю і дистанційного керування роботою приладу. Це привело до створення в 90-х роках електронних тахеометрів, що отримали назву “роботизованих” (першість тут належить все тій же фірмі “Геотронікс” – одному з найбільших світових лідерів геотроніки).

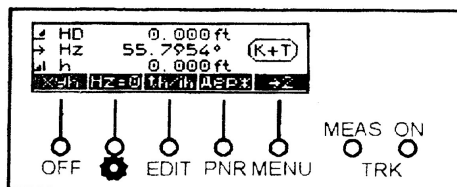
До 1998 року чотири фірми – Geotronics AB (Швеція), Spectra Physics Laserplane Inc. (США), Plus 3 Software Inc. (США) і Quadriga GmbH (Німеччина) – об'єдналися в компанію під назвою Spectra Precision, модульну геодезичну систему нового покоління, що розробила, – інтегровану знімальну систему на основі геодиметра (Geodimeter Integrated Surveying System), поєднуючи в собі електронний тахеометр, супутниковий приймач і могутній польовий пен-комп'ютер (комп'ютер, в якому клавіатуру замінює “світлове перо”, що дає можливість малювати і креслити від руки прямо на екрані; програмне забезпечення дає змогу потім перетворити таке накреслення “електронне крокі” в точний цифровий план місцевості).

Електронні тахеометри серії Elta R фірми Trimble-Zeiss (рис. 5.2, рис. 5.3, табл. 5.2) користуються великою популярністю завдяки простоті користування, крім того, його підставка – трегер є взаємозамінним з теодолітами типу 3Т2КП і 3Т5КП, що дає можливість виконувати вимірювання за триштативною системою.

Тахеометр Elta R має одноосьовий компенсатор вертикального круга. Діапазон роботи компенсатора $\pm 2'40''$, похибка вимірювання кута $5''$, віддалей – $5\text{мм}+3\text{мм/км}$, збільшення $26^{\times}$. У віддалемірному блоці використано фазовий метод із модулюванням випромінювання лазера (у деяких моделях).



Рис. 5.2. Електронний тахеометр Elta R 55



F₁ F₂ F₃ F₄ F₅

Рис. 5.3. Дисплей та клавіатура електронного тахеометра Elta R 55

Таблиця 5.2

Технічні характеристики тахеометра Elta R 55

Показники	Значення
С.к.п. вимірювання горизонтальних і вертикальних кутів	5"
С.к.п. вимірювання відстані	5 мм + $3 \cdot 10^{-6}$ S
Метод вимірювання відстані	Метод порівняння фази
Збільшення	26 ^x
Поле зору на 100м	2,9 м
Мінімальна вимірювальна відстань	1,75 м
Максимальна вимірювальна відстань	1500 м
Загальна довжина приладу	193 мм
Об'єм внутрішньої пам'яті	1900 строк
Діапазон роботи компенсатора	±2' 40"
Внутрішня пам'ять	1900 строк
Дисплей	128 x 32 пікселі
Маса, кг	3,5

Компанія Leica за свою історію розробила і випустила величезну кількість різних електронних тахеометрів. Найбільш оптимальною і найпопулярнішою лінійкою тахеометрів Leica є серія FlexLine. Тахеометри серії FlexLine – це найбільша лінійка електронних тахеометрів в сімействі Leica. У перекладі з англійської ("Flex" – гнучкий, "Line" – лінія) FlexLine означає “гнучка лінія”, тобто дані тахеометри можна застосовувати всюди для вирішення різноманітних інженерно-геодезичних завдань. Далі тахеометри FlexLine поділяються на три підсерії: TS02, TS06, TS09.

FlexLine TS02 – це прилади з точністю вимірювання кутів 3", 5" і 7", всі моделі адаптуються для роботи за температури -35°C (на це вказує слово "Arctic", в назві тахеометра), дальність вимірювання без відбивача 400 м (на це вказує слово “power” наприкінці назви, приклад: тахеометр Leica TS02 power 5"), а також великий функціонал дає можливість виконувати великий спектр робіт (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Зовнішній вигляд тахеометра Leica FlexLine TS02

FlexLine TS06 – це більш точні прилади з розширеною клавіатурою, точність вимірювання кутів 2", 3", 5", адаптація для роботи за низьких температур (до -35°C “Arctic”, наприклад: електронний

тахеометр Leica TS06 power 5" Arctic), по дальності вимірювання без відбивача тахеометри TS06 діляться на звичайні Leica TS06 – дальність до 30м, на Leica TS06 power дальністю до 400м, як і в тахеометрах TS02, і на Leica TS06 ultra – до 1000 м ("ultra" означає дальність без відбивача до 1000м, наприклад: тахеометр Leica TS06 ultra 5"Arctic). Можливості та області застосування тахеометрів серії FlexLine TS06 дуже великі: винос в натуру, обернена геодезична задача, передача позначки, геодезичні роботи з будівництва доріг, будівель та споруд, мережі згущення, тахеометричний хід та ін.

FlexLine TS09 – це найточніша серія приладів FlexLine, точність вимірювання кутів 1", 2", 3", адаптація до -35°C , вимірювання відстаней в режимі без відбивача: TS09 power – 400м, TS09 ultra –1000м, розширена клавіатура. Тахеометр Leica TS09 щонайкраще підходить для виконання робіт, де необхідна середня і висока точність.

Прилади серії TPS 400 компанії Leica представлені на ринку в різних виконаннях. Вони відрізняються один від одного кутовою точністю і здібностями далекоміра. По класах точності вимірювання кутів прилади поділяються на Leica TCR 403, Leica TCR 405, Leica TCR 407, остання цифра в назві означає дану характеристику (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Зовнішній вигляд тахеометра Leica TC(R) 405

У цій серії є прилади класу TC і прилади класу TCR, які відрізняються віддалемірним блоком, який називається EDM. Прилади класу TC мають один вбудований коаксіальний віддалемір для вимірювання відстаней в інфрачервоному діапазоні спектру за

допомогою призмового відбивача (режим вимірювань називається IR). Прилади класу TCR окрім інфрачервоного віддалеміра мають також лазерний коаксіальний віддалемір для вимірювання відстаней до предметів без відбивача (режим вимірювань називається RL). Для тахеометрів класу TCR можна вибрати кілька варіантів вимірювання відстані в режимі IR (на відбивач) і режимі RL (без відбивача), залежно від умов завдання (табл. 5.3).

Таблиця 5.3

Технічні характеристики тахеометра TC(R) 405

Показники	Значення
Збільшення зорової труби, крат	30 ^x
Межа фокусування, м	1,7 м
С.к.п. вимірювання горизонтального і вертикального кутів	5''
Точність лінійних вимірювань - на відбивач в режимі IR з точністю: IR-Fine – високоточні виміри на призму; IR-Fast – швидкі виміри з меншою точністю; IR-Track – безперервні виміри (режим стеження); IR-Tape – виміри на відбивачі типу Retro. Діапазон відстаней для швидких вимірювань. - вимірювання без відбивача в режимі RL з точністю: RL-Short – малі відстані (від 1,5 м до 80 м); RL-Track – безперервні виміри (режим стеження); RL-Prism – вимірювання великих відстаней на відбивач (до 9000 м).	(2 mm + 2 ppm) (5 mm + 2 ppm) (5 mm + 2 ppm) (5 mm + 2 ppm) від 1,5 м до 5400 м (3 mm + 2 ppm) (5 mm + 2 ppm) (5 mm + 2 ppm)
Компенсатор : - компенсація нахилів - точність компенсації	2-х осьовий ± 4' 1,5''
Лазерний висок	розташований так, що лазерний промінь співпадає з віссю обертання приладу
Точність відхилення лазерного променя від вискової лінії може бути	до 1,5 мм для висоти приладу 1,5 м
Діаметр лазерної точки лазерного виска	2,5 мм для висоти приладу 1,5 м

Продовження табл. 5.3

Показники	Значення
Дисплей: - фонові підсвітка; - підігрів за температури; - роздільна здатність; - 8 рядків, до 31 символу у кожному.	є нижче -5°C 280×160 Pixel
Підставка	Зйомна підставка GDF111; діаметр різьби 5/8"
Габарити: - висота тахеометра - ширина тахеометра - контейнер	360 мм 150 мм 468×254×355 мм
Вага тахеометра з акумулятором і трегером, кг	5,2
Живлення: - акумулятор GEB111 - акумулятор GEB121 - зовнішнє джерело	напруга 6 В; ємність 2100 мАч; напруга 6 В; ємність 4200 мАч; напруга повинна бути в межах 11,5 – 14,0 В.
Діапазон температур - збереження - вимірювання	-40°C ч +70°C -20°C ч +50°C
Пам'ять - внутрішня пам'ять	576 Кб
Автоматична корекція, яка проводиться тахеометром: - колімаційна похибка; - місце нуля; - кривизна Землі; - рефракція; - нахил осі обертання приладу; - реєстрація даних: порт RS232.	Так Так Так Так Так Так

Новітні досягнення науки і техніки втілюються в сучасних роботизованих тахеометрах. Це унікальні прилади, які забезпечені величезним набором апаратних засобів для вирішення за найкоротший період часу найскладніших геодезичних задач, забезпечуючи неймовірно високу точність, навіть за несприятливих погодних умов. Тахеометри Leica TPS 1200+ представлені трьома серіями: TCR 1200+, TCRA 1200+, TCRP 1200+.

Ці моделі мають такі характеристики: точність вимірювання кутів складає: 1", 2", 3", 5" (на це вказує остання цифра в позначенні, наприклад: Leica тахеометр TCR 1205+ R 400, тобто точність

вимірювання кутів складає 5", віддалемір без відбивача від 400 м до 1000м (додавання аббревіатури R400, означає, що даний тахеометр працює без відбивача на 400м, відповідно R1000 — 1000 м) (рис .5.6).

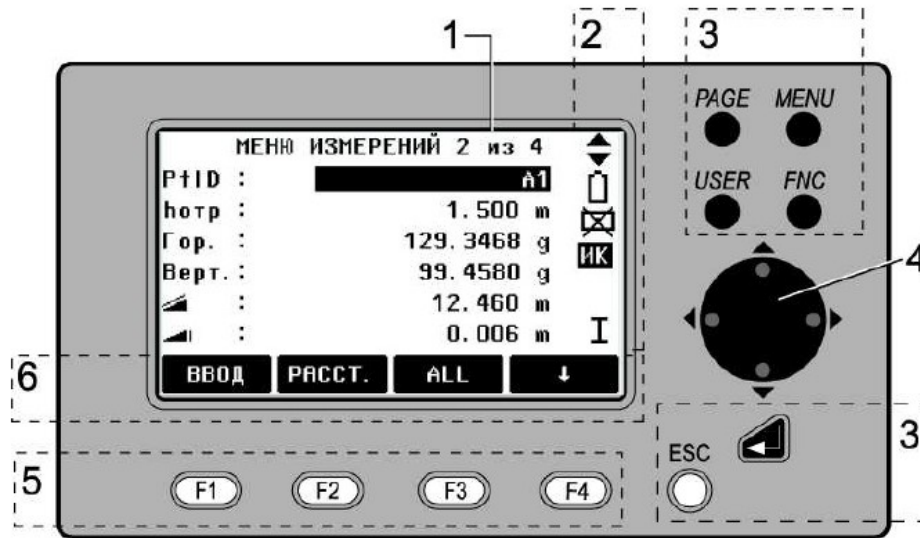


Рис. 5.6. Панель керування тахеометром TC(R)405:

- 1 – рядок введення інформації;
- 2 – індикатори стану основних систем тахеометра (наприклад, акумулятора, компенсатора, далекоміра і т.п.);
- 3 – системні кнопки з певними прописаними функціями (наприклад, кнопка червоного кольору зі стрілочкою для підтвердження введення інформації);
- 4 – кнопки для роботи з рядком інформації;
- 5 – функціональні кнопки, пов'язані з дисплейними кнопками;
- 6 – дисплейні кнопки

Моторизовані тахеометри TCR — оснащені моторами для автоматичного повороту, що дає можливість виконувати сканування. Автоматизовані тахеометри TCRA — крім моторів, оснащені системою автоматичного розпізнавання візирної цілі ATR. Роботизовані тахеометри TCRP — повністю моторизовані і автоматизовані тахеометри, система Power Sead (PS) дає можливість швидко знаходити і візирні цілі, також використання даного тахеометра забезпечує скорочення робочої бригади до 1-ї людини, що істотно скорочує витрати, людський фактор і оптимізує час. Нова лінійка сучасних роботизованих тахеометрів Leica: TS11, TS11I, TS15A, TS15I, TS15M, TS15P — це геодезичне обладнання майбутнього, моделі серії TS випереджаючи час прагнуть до вершини досконалості (рис. 5.7 – 5.10, табл. 5.4).



Рис. 5.7. Зовнішній вигляд тахеометра Leica TS11

Таблиця 5.4

**Технічні параметри ЕТ (живлення, робоча температура, маса)
[10, 22]**

Марка	Leica TDM 5005	Nikon NPL-632	Sokkia SRX1	Pentax 822NX	Topcon GTS-751	Trimble S8
Час роботи в годинах	5,5	6	9,5	8	12	11
Робоча температура в градусах С	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50	Від -20 до +50
Маса в кг	8,7	5,1	6,5	6,3	6,1	5,2

				
Camera	Leica Nova wide-angle + coaxial	Pentax Visio wide-angle	Topcon IS-3 wide-angle + coaxial	Trimble S9 wide-angle
Resolution	2560 x 1920	2048 x 1536	1280 x 1024	2048 x 1536
Field of view	15.5° x 11.7° 1.4° x 1.1°	7.0° x 5.3°	28° x 22° 1° x 1°	16.5° x 12.3°
Zoom	8x digital 30x optical	3x digital	4x digital 30x optical	8x digital
Scan speed	≤ 1000 pts/s	-	≤ 20 pts/s	≤ 15 pts/s
Scan range	≤ 1000 m	-	≤ 2000 m	≤ 250 m
Release	2013	2009	2011	2015

Рис.5.8. Порівняльна характеристика сучасних тахеометрів [33]

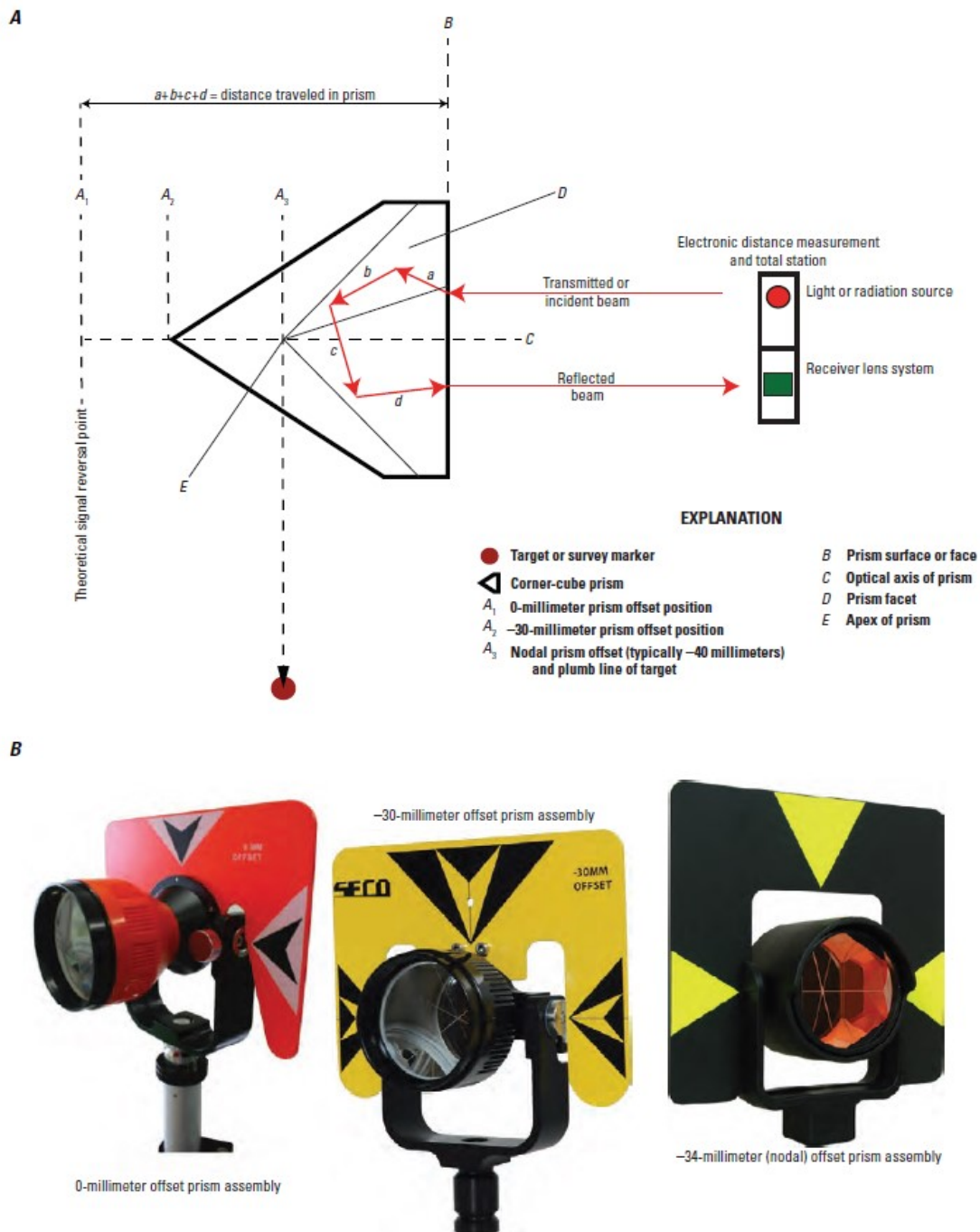


Рис. 5.9. Призмове обладнання для геодезичної зйомки:
 A – осі, промінь, що падає, відбитий промінь, кут падіння, вузловий центр та інші складові частини кутової призми; B – вузли кутової призми з різним зміщенням призми [32]

C



D

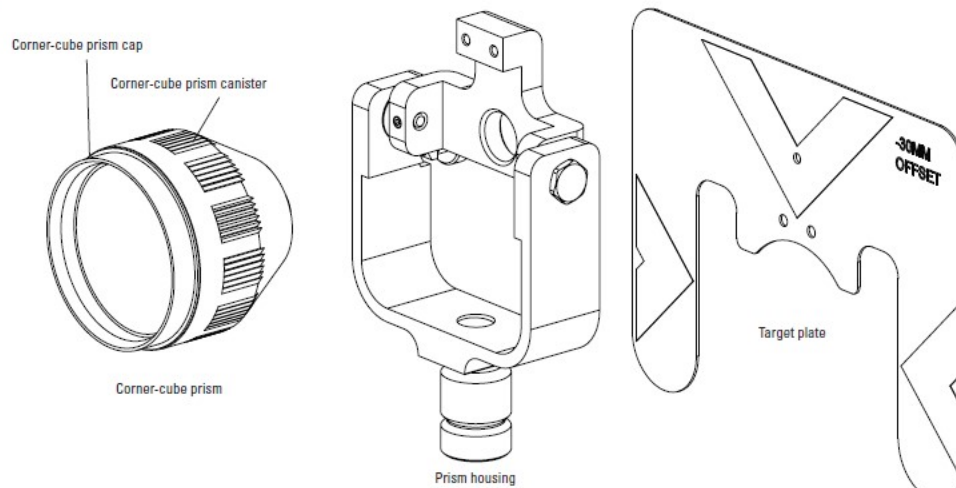


Рис. 5.10. Призмове обладнання для геодезичної зйомки:
C – різні типи призм та приладдя для призм; *D* – деякі компоненти вузла призми [32]

Нині електронні тахеометри є, разом з супутниковими приймачами, одним з основних засобів геодезичних вимірювань. Область їх застосування вельми широка. Вони можуть вирішувати такі практичні задачі, як, наприклад, винесення точок в натуру, вимірювання прольотів, розбиття за полярними координатами, визначення відстаней між точками по відношенню до початкової прямої, визначення висот неприступних точок, координатні задачі у разі вільного вибору точок стояння, визначення відхилень точок від заданих осей і ін.

Найважливішу роль грає відповідне програмне забезпечення електронного тахеометра [8, 10, 11, 26].

Контрольні запитання

1. З яких основних частин складається електронний тахеометр?
2. Які існують типи електронних тахеометрів?
3. Що представляє собою кутомірна частина тахеометру?
4. Які функції виконує мікропроцесор?
5. Що являють собою сучасні електронні тахеометри?
6. Які дії можна виконувати за допомогою електронних тахеометрів?

Лекція 9. Цифрові нівеліри

Для вимірювання перевищень у геодезії застосовують переважно геометричне, тригонометричне, барометричне нівелювання і гідронівелювання. Геометричне нівелювання виконують горизонтальними променем за допомогою нівеліра. За ДЕСТ нівеліри дотепер поділяють на технічні, точні та високоточні.

Нівеліри поділяють [11]:

За способом вимірювання:

– прилади з горизонтальним променем візування (які у свою чергу поділяють на дві групи):

1) з циліндричним рівнем, до яких належать глухі, з перекладною трубою, лазерні (візирна вісь замінена або дублюється лазерним променем);

2) з компенсатором;

– мікронівеліри;

– нівеліри гідромеханічні.

За способом зчитування відліків:

– звичайні (відлік по рейці, відлічує людина);

– цифрові (відлік автоматизовано).

За точністю:

– високоточні (для нівелювання I і II кл. та високоточних інженерних задач);

– точні (для нівелювання III і IV кл.);

– технічні (для пошукових та будівельних робіт).

Технічні нівеліри слугують здебільшого для створення висотної основи топографічного знімання, інженерно-геодезичних вишукувань і вимірювань у будівництві. Технічними нівелірами визначають перевищення із середньою квадратичною похибкою не більше ніж ± 10 мм на 1 км подвійного ходу.

Точними нівелірами виконують нівелювання III і IV класів. Крім того, їх зазвичай використовують для тих самих потреб, що й технічні. Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу точними нівелірами не повинна перевищувати ± 3 мм.

Високоточні нівеліри, які ще називають прецизійними, дають змогу визначити перевищення із середньою квадратичною похибкою не більше ніж $\pm 0,5$ мм на 1 км подвійного ходу. Їх використовують для

нівелювання I та II класу, а також для виконання прецизійних інженерно-геодезичних робіт.

Ще у середині минулого сторіччя на геодезичному виробництві експлуатувалися переважно оптичні нівеліри, що мали зорову трубу з циліндричним рівнем. Сьогодні оптичні нівеліри з рівнями випускають у невеликій кількості. Вони поступилися оптичним нівелірам з компенсаторами та цифровим (електронним) нівелірам. Проте нівеліри з рівнями зазвичай довговічні і поступаються двом сучасним згаданим типам лише швидкодією та зручністю.

Сучасні нівеліри мають удароміцний, пило-вологозахищений корпус. Зорова труба дає пряме зображення. Деякі фірми виробляють нівеліри, у яких зорова труба заповнена інертним газом, що робить їх абсолютно непроникними для вологості. Збільшення труби в різних моделях варіюється від 20х до 50х. Мінімальна фокусна відстань від 0,3 м, як наприклад в нівелірі SAL – 24, компанії Chicago Steel Corp./Berger [16].

Більшість точних і технічних нівелірів, що випускаються станом на 2010 р., мають автоматичний компенсатор, який дає змогу прискорити процес вимірювань і підвищити продуктивність. Для швидкого гасіння коливань компенсатора і установки його в робоче положення використовують прикріпленний до компенсатора повітряний, магнітний або рідинний демпфер. Магнітний демпфер дає можливість компенсатору утримувати горизонтальну візирну вісь у разі сильного вітру і в умовах вібрації, що особливо актуально під час роботи на будмайданчику. Ними забезпечені, наприклад, нівеліри Spectra Precision AL120 і AL124, нівелір SETL AT - 20D. Корисним доповненням до цих сучасних приладів є призма для прямого відображення бульбашки круглого рівня, пилозахищений горизонтальний лімб і навідні гвинти, що неперервно обертаються [16].

Не дивлячись на те, що сучасні оптичні нівеліри є глибоко удосконаленими інструментами, їх конструкція і принцип роботи практично не змінилися. Як простий геодезичний прилад, оптичний нівелір має тільки одну міру автоматизації у вигляді функції самоустановки в горизонт візирної осі. Здавалося б, що ще можна удосконалити або змінити. [16]

Технічні та точні нівеліри. Останнім часом у деяких фірмах, що виготовляють сучасні нівеліри, грань поділу між технічними та

точними приладами стала доволі умовною. Незначні технічні вдосконалення дають їм змогу виготовляти замість технічних точні нівеліри, що відповідно до точності збільшує їхню вартість.

Оптична схема нівеліра 2Н-10Л, яка подана на рис. 6.1, є традиційною для технічних нівелірів з контактним рівнем.

Особливістю конструкції його зорової труби є довжина напрямних для переміщення оправи фокусувального компонента 2, які лише трохи коротші від довжини самої труби, що дає змогу досягти більшої стабільності лінії візування під час перефокусування. У табл. 8.1 наведено деякі технічні дані нівелірів 2Н-10Л і 3Н-5Л.

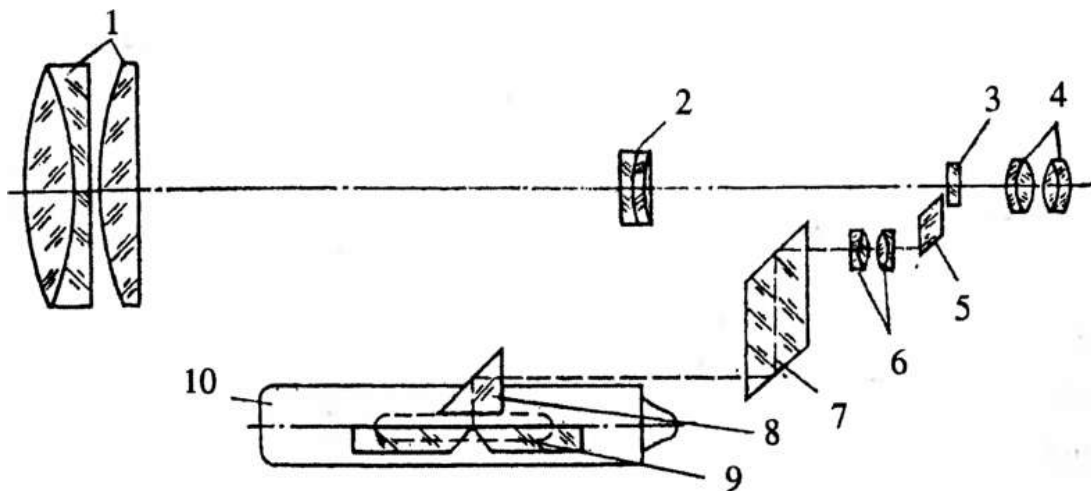


Рис. 6.1. Оптична схема технічного нівеліра 2Н-10 Л:

1 – об'єктив; 2 – фокусувальний компонент; 3 – сітка ниток; 4 – окуляр;
9, 8, 7, 5 – система призм для передавання зображення кінців бульбашки
циліндричного рівня у поле зору труби; 6 – мікрооб'єктив тієї самої
системи; 10 – циліндричний рівень

Точні нівеліри, які часто називають інженерно-будівельними, крім традиційних робіт з нівелювання використовують для розмічувальних робіт, а також для всіх видів нівелювання під час зведення інженерних споруд та встановлення устаткування, коли середня квадратична похибка визначення перевищень на 1 км подвійного ходу повинна лежати у межах $\pm 0,5 \dots 2$ мм. Світловий діаметр об'єктива зорових труб таких приладів 30...45 мм, а збільшення 20...35^x. Ціна поділки рівнів на трубі, зазвичай контактних, в рівневих нівелірах 10...30" (табл. 6.1). Останні звичайно мають елеваційні гвинти.

Технічна характеристика технічних нівелірів 2Н-10Л і 3Н-5Л

Показники	2Н-10Л	3Н-5Л
Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу, мм	9	5
Збільшення труби, крат	23 ^x	20 ^x
Ціна поділки рівня:		
циліндричного	45"	40"
сферичного	10'	10'
Найменша віддаль візування:		
без лінзової насадки, м	1,5	1,2
з лінзовою насадкою, м		0,5
Горизонтальний круг:		
ціна поділки	1°	1 гон/1°
точність відлічування	6'	0,1 гон/6'
Маса, кг	2,0	2,5

Сьогодні провідні фірми геодезичного приладобудування Leica, Trimble-Zeiss, Sokkia, Topcon, Nippon, Kern та інші пропонують десятки точних нівелірів різноманітної конструкції. Звичайно це нівеліри з компенсаторами.

Діапазон дії компенсаторів самовстановлених точних нівелірів 10...15', а середня квадратична похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан $\pm 0,2...0,6''$. Точні нівеліри часто устатковують горизонтальним кругом, що дає можливість вимірювати ними горизонтальні кути, щоправда, з невисокою точністю. Ціна поділки встановленого сферичного рівня здебільшого 5...10'. Навідні пристрої нівелірів з компенсаторами мають зазвичай нескінченний привід із фрикційним затискуванням. Деякі точні нівеліри для розширення їхніх функцій устатковують оптичними мікрометрами.

Деякі марки точних нівелірів, які випускають відомі фірми: серії NA 700 (NA 720, NA 724, NA 728, NA 730); серії RUNNER (RUNNER 20, RUNNER 24) (Leica); Ni 30, Ni 40, Ni 50; серії AL (AL 232, AL 228, AL 124, AL 120) (Trimble-Zeiss); B 2₁ B 1, C 4₁, C 4₁₀ (Sokkia), 3Н-3КЛ, 3Н-2КЛ, 4Н-2КЛ (УОМЗ); НИ-3 (рис. 6.2), НИК-2 (Ізюмський завод, Україна).



Рис. 6.2. Зовнішній вигляд нівеліра НИ-3 (Україна)

Звичайно, не можна не відзначити, що точні нівеліри виготовляє українська приладобудівна промисловість. Нівелір з рівнем НИ-3 має середню квадратичну похибку вимірювання перевищення на 1 км подвійного ходу $\pm 2,2$ мм, а самовстановивний нівелір НИК-2 – ± 2 мм.

Високоточні нівеліри. Високоточні (прецизійні) нівеліри, крім традиційних вимірювань, застосовують для визначення рухів земної кори, осідань споруд, деформацій великогабаритних механізмів та інших видів робіт, для контролю виконання яких необхідне прецизійне нівелювання. Довгофокусні зорові труби високоточних нівелірів мають світловий діаметр об'єктива 45...60мм. Збільшення труб становить 35...50 $\times$. Ціна поділки рівня на трубі, як звичайно, контактної, 5"...10". Рівневі нівеліри обладнані елевацийним гвинтом. Компенсатори самовстановивних високоточних нівелірів мають діапазон дії від 5' до 30', а середня квадратична похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан 0,2". Деякі високоточні нівеліри устатковані горизонтальним кругом. Навідні пристрої самовстановивних нівелірів мають нескінченний привід.

Підвищення точності прецизійних нівелірів досягають, обладнуючи їх оптичним мікрометром з плоскопаралельною платівкою. В сучасних високоточних нівелірах шкалу оптичного мікрометра відлічують у полі зору зорової труби. Сітка ниток високоточних нівелірів має клиноподібний бісектор. Загалом високоточні нівеліри масивніші та стійкіші від точних.

У геодезичному виробництві України широко використовувався і застосовується сьогодні високоточний нівелір з рівнем Н-05 (СРСР) (рис. 6.3).

У полі зору труби нівеліра Н-05 одночасно видно зображення рейки, кінців бульбашки циліндричного контактного рівня з поділками ампули і шкалу оптичного мікрометра. Сітка ниток нівеліра Н-05 звичайно має клиноподібний бісектор. Корпус зорової труби Н-05 термостатований.

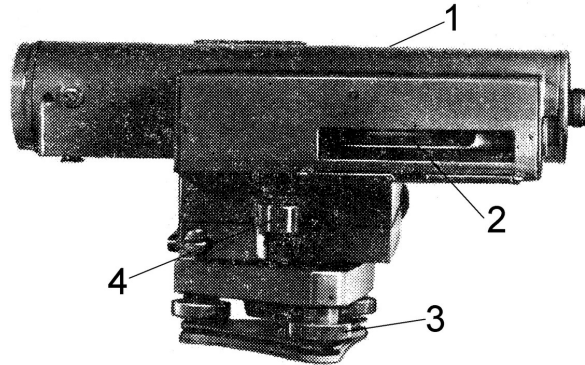


Рис. 6.3. Високоточний нівелір Н-05:

1 – зорова труба у термостатованому корпусі; 2 – контактний рівень;
3 – підставка нівеліра; 4 – встановлений рівень

Оптичну схему нівеліра Н-05 подано на рис. 6.4, де 1 – насадка; 2 – клин для юстування відхилення від паралельності осі циліндричного рівня та візирної осі зорової труби; 3 – плоскопаралельна платівка; 4 – об'єктив; 5 – фокусувальний компонент; 6, 7 – призми передавання зображення шкали оптичного мікрометра у поле зору труби; 8 – сітка ниток; 9 – окуляр; 10, 12, 16, 18 – призми системи передавання зображення кінців бульбашки циліндричного рівня у поле зору труби; 11 – мікрооб'єктив тієї самої системи; 13 – шкала оптичного мікрометра; 14 – дзеркало циліндричного рівня; 15 – захисне скло циліндричного рівня; 17 – циліндричний рівень. Вона є традиційною для нівелірів з контактним циліндричним рівнем.

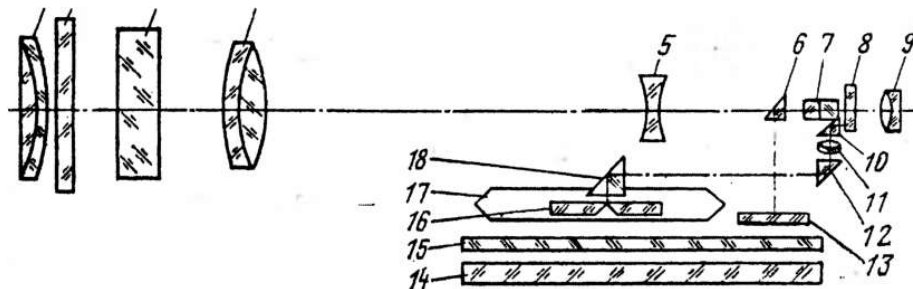


Рис. 6.4. Оптична схема високоточного нівеліра Н-05

Високоточні нівеліри з рівнями деколи виготовляють провідні приладобудівні фірми світу, наприклад, високоточний нівелір N3 фірми Leica, високоточний нівелір PL1 фірми Sokkia. В обох названих нівелірах середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу становить 0,2 мм.

У табл. 6.2 наведено деякі технічні дані нівелірів Н-05 і N3.

Таблиця 6.2

Технічна характеристика високоточних нівелірів Н-05 і N3

Показники	Н-05	N3
Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу, мм	0,4	0,2
Збільшення зорової труби, крат	42 ^x	47 ^x
Кут поля зору (поле зору на 100 м)	55'	1,8 м
Найменша віддаль візування, м	2,0	0,45
із лінзовою насадкою, м	1,0	-
Світловий діаметр об'єктива, м	45	52
Ціна поділки рівня:		
циліндричного труби	10"	10"
встанівного сферичного	5'	10'
Чутливість циліндричного рівня труби	0,2"	0,2"
Маса, кг	6,0	5,1

Самовстанівні високоточні нівеліри переважають рівневі як за загальною кількістю, так і за кількістю моделей, які випускають провідні фірми світу, наприклад, Ni 10, (Trimble-Zeiss); NA2/NAK2 (Leica); B1C, B1 (Sokkia) та інші.

Високоточний нівелір Ni 002 фірми Carl Zeiss Jena оригінальної конструкції дотепер експлуатується геодезичними підприємствами України і за технічними даними мало чим поступається сучасним нівелірам такого самого призначення. На рис. 6.5 подано оптичну схему дзеркально-лінзової зорової труби нівеліра, оптичного мікрометра та встанівного рівня. На схемі: 1 – телескопічна система; 2 – призма; 3 – лінзи; 4 – сітка ниток; 5 – світлорозподільна призма; 6 – оптичний юстувальний клин; 7 – об'єктив зорової труби; 8 – лінза системи передавання зображення сферичного рівня; 9 – лінза системи передачі

зображення шкали оптичного мікрометра; 10 — призма системи передавання зображення сферичного рівня; 11 — призма системи передавання зображення шкали оптичного мікрометра; 12 — призма освітлення; 13 — нерухомий індекс шкали оптичного мікрометра; 14 — шкала оптичного мікрометра; 15 — об'єктив мікрометра; 16 — дзеркало освітлення сферичного рівня; 17 — сферичний рівень; 18 — призма системи передавання зображення сферичного рівня; 19 — підвіска; 20 — дзеркало системи передавання зображення шкали оптичного мікрометра; 21 — дзеркало компенсатора; 22, 24, 25 — призми передавання зображення; 23 — окуляр зорової труби; 26 — рукоятка механізму обертання на 180° дзеркала компенсатора; 27 — демпфер; 28 — фокусувальний гвинт; 29 — гвинт механізму переміщення об'єктива (маховичок оптичного мікрометра).

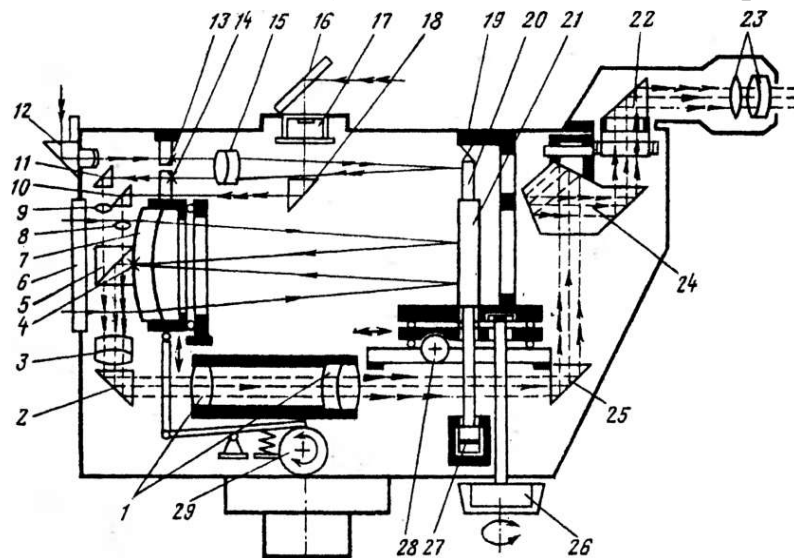


Рис. 6.5. Оптична схема високоточного нівеліра Ni 002:

- > — шлях променя від візирної цілі;
- >> — шлях променя через шкалу оптичного мікрометра;
- >>> — шлях променя через встановлений рівень.

Промені від візирної цілі проходять об'єктив 7, відбиваються рухомим поворотним дзеркалом компенсатора 21, що розгойдується, і формують зображення цілі у площині сітки ниток 4, яка наклеєна на зовнішньому боці об'єктива 7. Через систему призм 5, 2, 25, 24, 22, лінзу 3 і телескопічну систему 1 зображення візирної цілі потрапляє до окуляра 23. Дзеркало 21, яке підвішене до корпусу труби, є рухомим елементом компенсатора маятникового типу. Дзеркало 21 може

обертатися на 180° рукояткою 26. Це допомагає уникнути впливу похибок компенсації на результати вимірювань.

Фокусують зорову трубу, переміщуючи дзеркало 21 гвинтом 28. Передбачена можливість грубого і точного фокусування. Суміщення сітки ниток 4 з об'єктивом 7 за наявності дзеркала 21 дає змогу уникнути похибки за перефокусування зорової труби.

Частки поділки рейки вимірюють оптичним мікрометром, основною частиною якого є рухомий об'єктив 7 зорової труби. Шкала оптичного мікрометра 14 скріплена з об'єктивом 7. Об'єктив 7 із сіткою ниток 4 та шкалою мікрометра 14 переміщується гвинтом 29 у площині, перпендикулярній лінії візування. Промінь світла через призму 12, нерухомий індекс 13, об'єктив мікрометра 15, відбивається дзеркалом 20, яке скріплене з дзеркалом 21 і повторно проходить об'єктивом 15, проектує зображення індексу на шкалу мікрометра. Зображення шкали мікрометра та індексу системою, що складається з оптичних деталей 11, 9, 3, 2, 1, 25, 24 і 22, передаються в окуляр 23.

У поле зору труби, крім зображення рейки та шкали мікрометра з індексом, передається зображення встановного сферичного рівня. Промінь від дзеркала 16 через рівень 17 проходить оптичною системою, що містить деталі 18, 10, 8, 3, 2, 1, 25, 24, 22 в окуляр 23. Горизонтальність візирного променя регулюється обертанням юстувального клина 6, що одночасно є захисним склом об'єктива зорової труби.

У табл. 6.3 наведено деякі технічні дані нівелірів Ni 002, Ni 10, NAK 2, B 1C.

Загалом сучасні високоточні нівеліри з компенсаторами різних фірм за основними технічними даними не набагато відрізняються один від одного. Наприклад, всі вони устатковані оптичним мікрометром, який може бути знімним, всі мають горизонтальний круг, похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан не перевищує 0,3" та інше. Тим не менше, кожна з моделей нівелірів має свої характерні ознаки.

Фірма-виробник рекомендує нівелір Ni 10 (рис. 6.6) як універсальний прилад для нівелювання всіх класів, високоточного наземного та підземного інженерно-геодезичного нівелювання тощо.

Нівелір устаткований світловим сигналом горизонтального стану лінії візування, який спрацьовує, коли відхилення її від горизонтальності перевищує допустимі. Зорова труба нівеліра герметична і наповнена

газом для більшої захищеності від зовнішніх впливів. Компенсатор нівеліра нечутливий до вібрації. Механізм фокусування може працювати у режимі грубо і точно. Фірма Sokkia пропонує B1C (рис. 6.7) як один із найкращих нівелірів, що вона виготовляє.

Таблиця 6.3

Технічна характеристика нівелірів Ni 002, Ni 10, NAK 2, B1C

	Ni 002	Ni 10	NAK 2	B1C
Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км ходу, мм	0,2	0,3	0,3	0,5
Збільшення зорової труби, крат	40 ^x	32 ^x , 25 ^x , 36 ^x , 41 ^x	32 ^x , 40 ^x	32 ^x
Кут поля зору (поле зору на 100 м)	1°15'	2,3 м	2,4 м	1°20'
Найменша віддаль візування, м	1,5	0,5	1,6	2,3
Світловий діаметр об'єктива	48	45	45	45
Діапазон дії компенсатора	10'	30'	30'	30'
Похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан	0,05"	0,2"	0,3"	0,3"
Ціна поділки встановного (сферичного) рівня	8'	10'	10'	10'
Горизонтальний круг:				
ціна поділки		1 гон/1°	1 гон/1°	1°
точність відлічування		0,1 гон/6'	0,1 гон/6'	1'
Маса, кг	6,5	2,9	2,4	3,2



Рис. 6.6. Високоточний нівелір Ni 10



Рис. 6.7. Високоточний нівелір B1C

Оптичний мікрометр нівеліра B1C, що має ціну поділки 0,1 мм, дає змогу відлічувати з точністю 0,01 мм. Компенсатор приладу, обладнаний магнітним демпфером, нечутливий до зміни атмосферних умов, вібрації та ударів. Фокусувальний механізм має дві швидкості пересування фокусувального компонента. За необхідності сітку ниток нівеліра можна підсвічувати.

Цифрові (електронні) нівеліри. Цифрові (електронні) нівеліри є новим поколінням приладів для визначення висот точок. Наявність у конструкції приладів електронних давачів дає змогу в автоматичному режимі відлічувати рейки зі штриховим кодом, контролювати результати вимірювань, опрацювати їх вмонтованою у прилад ЕОМ і зберігати у накопичувачі.

Головною особливістю даних інструментів є можливість автоматичного зняття відліку по спеціальній рейці з нанесеним штрих-кодом. Для цього рейка має бути достатньо освітлена. Штрих-код не повторюється по усій її довжині і, таким чином, дає можливість визначити відстань від п'яти рейки до місця наведення горизонтальної нитки труби нівеліра. Інструмент може виміряти відстань до рейки з точністю до 0,5 м. Він забезпечений процесором, що забезпечує обчислення перевищень і відміток, рідкокристалічним дисплеєм для виведення результатів на екран, а також внутрішньою пам'яттю для запису даних в цифровому вигляді. [16]

Завдяки передовим технологіям цифрові нівеліри забезпечують можливість спростити роботу виконавця в полі і значно збільшити продуктивність праці. Оскільки вони зчитують і записують дані в цифровій формі, то помилки спостерігача виключаються, а також забезпечується цілісність результатів. Можливість виміру відстаней забезпечує контроль відстані до передньої і задньої рейок і дотримання рівності плечей в нівелірних ходах. [16]

Окрім екрану цифровий нівелір забезпечений клавіатурою для управління приладом і введення різної інформації: номерів нівельованих точок, відмітки нівелірних реперів та ін. За допомогою вбудованого програмного забезпечення можна управляти роботою інструменту, виконуючи виміри по визначеній методиці.[16]

Для автоматичного відлічування штрихкової рейки достатньо її тридцятисантиметрового відрізка – по 15 см догори і донизу від лінії візування. На одне вимірювання витрачають від трьох до дев'яти секунд. Багаторазові вимірювання осереднюються автоматично. Цифровими нівелірами вимірюють перевищення і довжини плечей нівелювання. Програмне забезпечення цифрових нівелірів дає змогу одразу після наведення приладу на рейки одержати перевищення та відмітки точок нівелювання. Повторні вимірювання практично виключаються внаслідок автоматичного визначення похибок і введення поправок. Програмним забезпеченням деяких сучасних цифрових нівелірів передбачено врівноваження вимірювань. Загалом цифрові нівеліри дають можливість повернутися до перерваних вимірювань. Панелі керування приладів слугують також для алфавітно-цифрового введення номерів та кодів точок і різновидів додаткової інформації. Результати вимірювань та їхнього опрацювання можуть бути занесені до карт пам'яті або до внутрішньої пам'яті приладу. Цифрові нівеліри зазвичай споряджені компенсаторами нахилу.

Разом із автоматичним режимом цифровими нівелірами можна виконувати візуальне нівелювання як оптичними нівелірами, застосовуючи рейки із традиційними шкалами, звичайно, з меншою точністю. Вважають, що використання цифрових нівелірів підвищує продуктивність виконуваних робіт на 50%. За мінімального часу одного вимірювання ємності батарей деяких нівелірів може вистачити на три дні.

Цифрові нівеліри виготовляють провідні фірми світу Trimble-Zeiss — DiNi 10, DiNi 11, DiNi 11 T, DiNi 12, DiNi 12T, DiNi 20, DiNi 21, DiNi22; Leica — NA 2002, NA 3003; DNA 10, DNA 03; Sprinter 100 (100 M); Sprinter 200 (100 M); Sokkia — SDL30 та інші. За точністю цифрові нівеліри можна характеризувати як високоточні та точні.

Очевидно, що сучасні високоточні цифрові нівеліри різних фірм, наприклад, DiNi 12 (рис. 6.8) і DNA 03 (рис. 6.9) за своїми технічними можливостями незначно поступаються один одному.



Рис. 6.8. Високоточний нівелір DiNi 12



Рис. 6.9. Високоточний нівелір DNA 03

Нівелір DiNi 12 є дещо модифікованою моделлю нівеліра DiNi 10 (DiNi 11) і практично збігається з ними за технічними даними.

Високоточні цифрові нівеліри DiNi 12 (DiNi 10, DiNi 11) і DNA 03 слугують для нівелювання I і II класу, а також для прецизійних інженерно-геодезичних вимірювань. Крім стандартних для цифрових нівелірів режимів роботи програмне забезпечення нівелірів DiNi 12 і DiNi 12 T передбачає можливість зрівноваження результатів вимірювань. Нівелір DiNi 12T (DiNi 11T) від цифрових нівелірів такого самого класу відрізняється тим, що ним можна визначати координати точок нівелювання, тобто працювати у режимі тахеометра. Коли DiNi 12T працює як тахеометр, точність вимірювання ним віддалей у разі застосування інварної кодової рейки становить $0,5D \times 0,01$ м, а складаної кодової — $1,0D \times 0,01$ м (D — віддаль від нівеліра до рейки). Час фіксування кутового вимірювання — 0,3 секунди.

Відмінною рисою приладів DiNi 10, DiNi 11, DiNi 11T, DiNi 12 і DiNi 12T є можливість запису результатів вимірювань та опрацювання їх у карті пам'яті PCMCIA ємністю від 256 KB до 8MB.

Цифрові нівеліри DiNi 20, DiNi22, NA 2002, DNA 10, SDL 30 за стандартами оптичних нівелірів можна характеризувати як точні. Деякі технічні дані нівеліра SDL 30 наведено у табл. 6.4.

Названі точними цифрові нівеліри, деякі технічні дані яких наведено у табл. 8.4, як і високоточні, за основними показниками неістотно відрізняються один від одного. Проте, звичайно, кожна з моделей має певні відмінності. Зокрема, в DiNi 22 є можливість записування даних у внутрішню пам'ять приладу, що має ємність у 2200 рядків і якої достатньо для розв'язування різноманітних задач.

Таблиця 6.4

Технічна характеристика цифрового нівеліра SDL30

Показники	DiNi 22	SDL30
Середня квадратична похибка визначення перевищення на 1 км подвійного ходу, мм		
Електронні вимірювання:		
Відлічуванням інварної кодової рейки	0,7	
відлічуванням фібергласової кодової рейки		1,0
відлічуванням складаної кодової рейки	1,3	
Візуальне відлічування складаної рейки	2,0	1,0
Віддаль нівелювання, м		
інварна кодова рейка	1,5...100	
фібергласова кодова рейка		1,6...100
складана кодова рейка	1,5...100	
Візуальне відлічування, м	від 1,3	від 1,5

Продовження таблиці 6.4

Показники	DiNi 22	SDL30
Точність вимірювання віддалей:		
довжин плечей нівелювання, мм		
інварна кодова рейка	25	
фібергласова кодова рейка		До 10 м 10 мм 10...50 м 1% D >50 м 0,2 % D
складана кодова рейка	30	
Точність відлічування електронного вимірювання, мм		
перевищень	0,1	0,1
довжин плечей нівелювання	1,0	1,0
Час електронного відлічування рейки, с	2	3
Збільшення зорової труби, крат	26 ^x	32 ^x
Світловий діаметр об'єктива, мм	40	45
Поле зору на 100 м (кут поля зору), м	2,2	1 ⁰ 20'
Діаметр дії компенсатора	15'	15'
Похибка приведення лінії візування у горизонтальний стан	0,5''	0,5''
Ціна поділки встановного (сферичного) рівня	10'	10'
Горизонтальний круг:		
ціна поділки	1 гон/1 ⁰	1 ⁰
точність відлічування	0,1 гон/ 0,1 ⁰	0,1 ⁰
Маса, кг	2,8	2,4

Комплект нівеліра SDL30 (рис. 6.10), який також має внутрішню пам'ять, обладнано фібергласовою рейкою, що відчутно не позначилося на точності вимірювань. За рекомендаціями фірми-виробника надійність та точність вимірювань не погіршується за несприятливих умов нівелювання, а саме: нерівномірного освітлення; руху шарів повітря; вібрації.



Рис. 6.10. Цифровий нівелір SDL 30

Компенсатор нівеліра, який має магнітний демпфер, стійкий до ударів. Нівелір виконано у волого водостійкому варіанті. Програмне забезпечення нівеліра SDL30 здебільшого збігається із забезпеченням двох згаданих поряд з ним моделей [8, 10, 11, 26].

Контрольні запитання

1. На які види поділяють нівеліри за ДЕСТ?
2. Яке призначення високоточних, точних та технічних нівелірів?
3. Які особливості у конструкції цифрових нівелірів?

Лекція 10. Лазерні сканери

Побудова і принципи роботи лазерних сканерів. Метод наземного лазерного сканування (НЛС) метод дає змогу створити цифрову модель всього навколишнього простору, подавши його набором точок з просторовими координатами. Основна відмінність від традиційних приладів і методів - набагато більша швидкість вимірювань, сервопривід, що автоматично повертає вимірювальну головку в обох – горизонтальній та вертикальній – площинах і найголовніше – швидкість 5000 вимірювань за секунду (в середньому) і щільність до десятків точок на 1 см² поверхні. Одержана після вимірювань модель об'єкта є гігантським набором точок (від сотень тисяч до декількох мільйонів), що мають координати з точністю від 1 до декількох міліметрів [11].

Що таке тривимірний сканер? Принцип роботи лазерного сканера аналогічний принципу роботи безвідбивного електронного тахеометра і полягає у вимірюванні часу проходження лазерного променю від випромінювача до поверхні, що відбиває, і назад до приймача. Шляхом ділення цього часу на швидкість поширення лазерного променю визначається відстань до об'єкта.

Сканер складається з лазерного далекоміра, адаптованого для роботи з високою частотою, і блоку розгортки лазерного променю. В якості блоку розгортки в сканері виступають сервопривід і полігональне дзеркало або призма. Сервопривід відхиляє промінь на задану величину в горизонтальній площині, тоді повертається вся верхня частина сканера, яка називається голівкою. Розгортка у вертикальній площині здійснюється за рахунок обертання або гойдання дзеркала.

У процесі сканування фіксується напрямок поширення лазерного променю і відстань до точок об'єкта. Результатом роботи сканера є растрове зображення –скан, значення пікселів якого являють собою елементи вектора з наступними компонентами: виміряною відстанню, інтенсивністю відбитого сигналу і RGB-складової, що характеризує реальний колір точки. Для більшості моделей НЛС характеристики реального кольору для кожної точки сполучено за допомогою неметричної цифрової камери [11].

Іншою формою представлення результатів наземного лазерного сканування є масив точок лазерних віддзеркалень від об'єктів, що знаходяться в полі зору сканера, з п'ятьма характеристиками, а саме

просторовими координатами (x, y, z), інтенсивністю і реальним кольором [11].

В основу роботи лазерних далекомірів, використовуваних у сканерах, покладені імпульсний і фазовий безвідбивні методи вимірювання відстаней, а також метод прямої кутової розгортки (триангуляційний метод).

Лазерні 3D-сканери можна додатково класифікувати за принципом ведення вимірювань на [11]:

- імпульсні сканери мають перевагу щодо далькості вимірювань;
- фазові сканери мають перевагу у швидкості (на порядок), але втрачають точність зі зростанням віддалі до об'єкта, тому зазвичай застосовуються для знімання інтер'єрів або замкнутих просторів (тунелів, печер тощо).

Leica BLK360-2 – це компактна, інтуїтивно зрозуміла в роботі модель лазерного 3D Сканера, спеціально розроблена для сканування в приміщенні з діапазоном до 45 м. Швидкість сканування 680 000 точок/с (рис. 7.1).



Рис. 7.1 Лазерний 3D сканер Leica BLK360

Дані BLK360 є цінними для багатьох цілей – від традиційного BIM до створення VFX і VR — і користувачі можуть легко передавати їх і працювати з ними у вашій екосистемі програмного забезпечення, щоб створювати захоплюючі та високоточні результати (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Характеристика лазерного 3D сканера Leica BLK360

Показник	Значення показника
Тип інструменту	Високошвидкісний, компактний лазерний 3D сканер з вбудованими інфрачервоними і оптичними камерами
Накопичувач даних	Вбудований SSD диск на 180 Гб
Фотокамера	Система з 4-х камер, 13 Мп
Швидкість сканування	до 680 000 точок/сек
Діапазон виміру	від 0.5 м до 45 м
Поле зору(гор/верт)	360° / 270°
Клас лазера	1
Тип батареї	Внутрішня: Li-Ion
Робоча температура	+0° .. +40°C
Температура зберігання	-40° .. +70°C
Стандарт захисту	IP54
Освітлення	Працює в абсолютній темряві і за умови яскравого світла
Вага	0.75 кг
Розміри сканера	80 мм x 80 мм x 155 мм

Leica RTC360 – це новий наземний лазерний 3D сканер від Leica Geosystems, виконаний у компактному дизайні, який виконує сканування зі швидкістю до 2 млн. точок за секунду (рис. 7.2). Цей прилад є професійним рішенням та підходить для роботи як в офісі, так і в польових умовах. Так само, як і BLK360, мобільний сканер RTC360 вкрай простий у застосуванні та з легкістю виконає високопродуктивне сканування об'єктів на відстані до 130 метрів, генеруючи кольорову тривимірну HDR хмару точок менш ніж за 2 хвилини.



Рис. 7.2. Лазерний сканер Leica RTC360 (<https://leica-geosystems.com.ua/product/rtc360/>)

Лазерний сканер Trimble TX6 (рис. 7.3) забезпечує поле захоплення $360^{\circ} \times 317^{\circ}$. Звичайний час сканування повної панорами становить близько 3 хвилин, протягом яких знімається 34 мільйони точок, або 6 хвилин для зйомки 138 мільйонів точок.

Trimble TX6 (табл. 7.2) підтримує найвищу точність позиціонування точок на відстані до 80 м, без зниження швидкості. До того ж, можлива додаткова модернізація, що збільшує дальність вимірювань до 120 м. Здатність Trimble TX6 до захоплення високоточних 3D-даних високої щільності, у поєднанні з ПЗ Trimble RealWorks, інструментами віртуального моделювання, аналізу та управління даними, роблять цей лазерний сканер закінченим рішенням для професіоналів від будівництва.



Рис. 7.3. Лазерний сканер Trimble TX6

Таблиця 7.2

Характеристика лазерного 3D сканера Trimble TX6

Показник	Значення показника
Гарантія, років	1
Температура робоча	від 0 °C +40 °C
Час роботи	2 год
Вага, кг	11 кг
Пило- та вологозахист	IP54
Принцип виміру дальності	Технологія Trimble Lightning™
Швидкість сканування	500 000 пікселів/сек
Шум далекоміра	<2 мм у стандартному режимі
Клас лазера	1, безпечний для очей відповідно до IEC EN60825-1
Діаметр пучка лазерного променя	6-10-34 мм на 10-30-100 м
Мінімальна відстань	0,6 м
Поле зору для сканування	360° x 317°
Кутова точність	80 рад
Зберігання даних	Флеш-диск USB 3.0
Дистанційне керування	ПК або планшет з ОС Windows 7 або пізніше, з'єднання USB4
Розміри	335x386x242 мм
Потужність	72 Вт
Освітленість	Будь-які умови освітлення всередині та поза приміщеннями (без обмежень)

Для навчальних завдань рекомендовано також використовувати віртуальний сканер – це програмний інструмент, що генерує великі обсяги даних, як аналог хмари точок – результат роботи наземного лазерного сканера, що дає можливість користувачам створювати дані за відсутності реального вимірювального приладу. Наземні лазерні сканери залишаються малодоступними в Україні (як правило, використовуються в профільних комерційних організаціях).

У рамках проєкту DAAD «Розроблення віртуального середовища з навчання технологіям діджиталізації навколишнього світу VirScan3D» за участі Ю.В. Горковчук та Д.В. Горковчук (Київський національний університет будівництва та архітектури), а також науковців Інституту прикладної фотограмметрії та геоінформатики та Інституту археології, наук про спадщину та історію мистецтв (Німеччина) було розроблено такий віртуальний сканер.

Віртуальний сканер імітує комерційно доступні інструменти з реалістичними інтерфейсами користувача та створює хмари точок відповідно до індивідуальних специфікацій та налаштувань. В якості навчальних об'єктів може використовуватися будь-яка цифрова 3D-модель (наприклад, об'єкту культурної спадщини чи будівництва), яка віртуально сканується у цифровому середовищі. За допомогою такої системи викладачі та студенти зможуть навчитися керувати такими системами, генерувати реалістичні великі дані та виконувати повний ланцюжок обробки даних (рис. 7.4 – 7.6) [24].

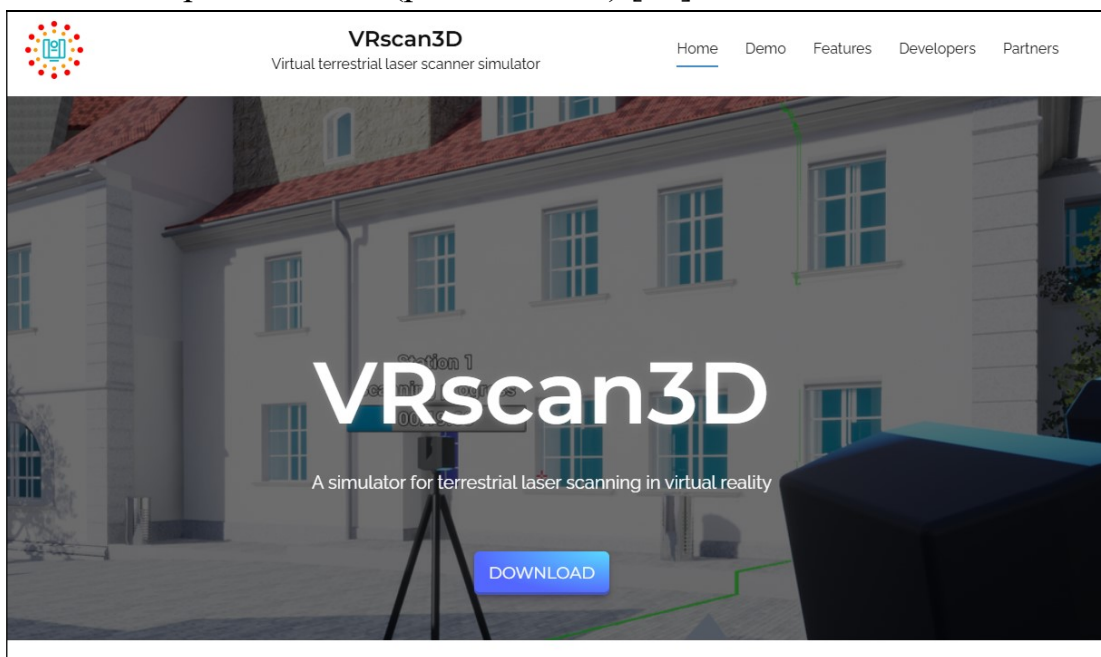


Рис. 7.4. Веб-сторінка віртуального сканера

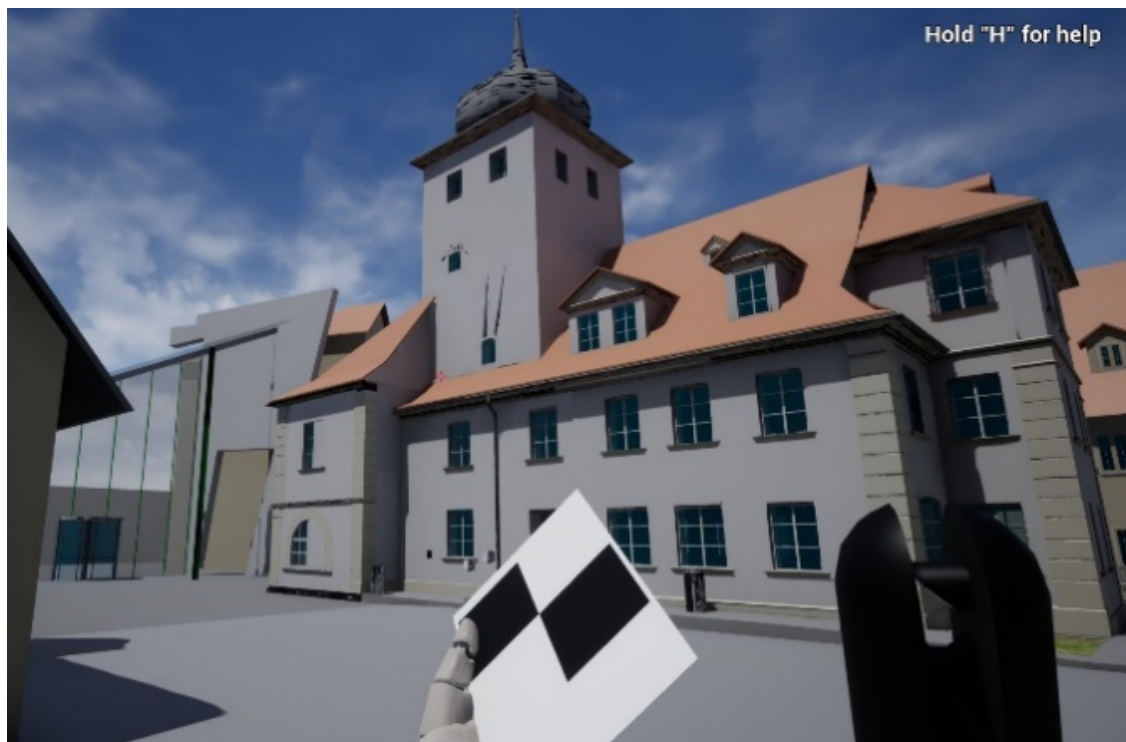


Рис. 7.5. Фрагмент інтерфейсу віртуального сканера під час встановлення марки

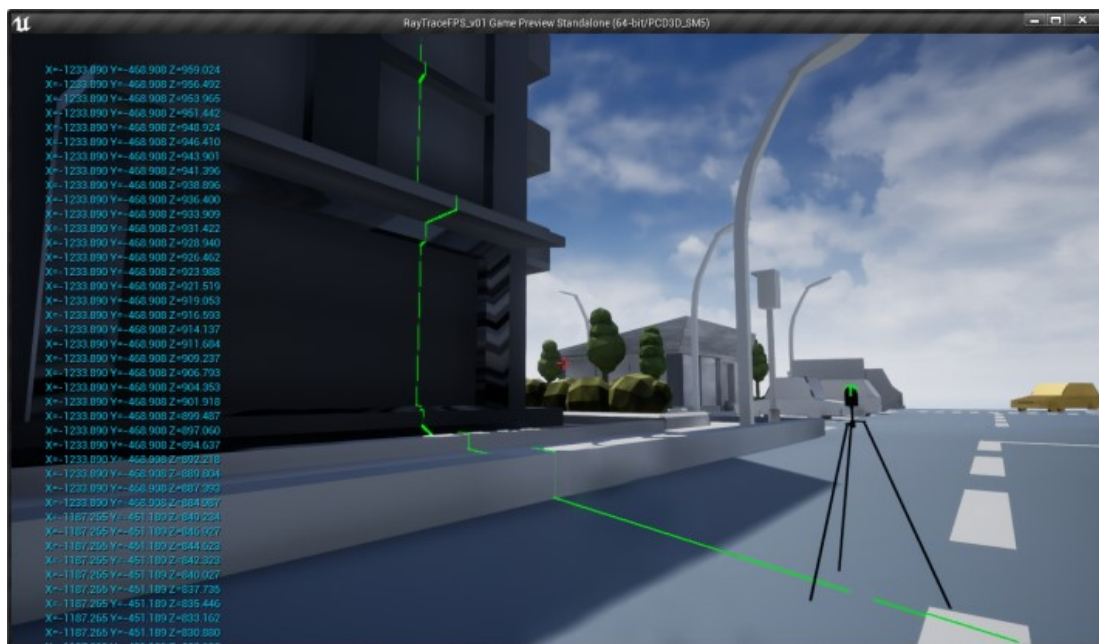


Рис. 7.6. Фрагмент інтерфейсу віртуального сканера

Опрацювання вимірювань лазерного сканування.

1. Трансформація сканів у проєктну систему координат. (прив'язка)

Лазерний сканер має свою власну систему координат, жорстко пов'язану з одним із його конструктивних елементів (зазвичай у центрі приймально-передавальної частини). Усі "сірі" дані, отримані під час

сканування, відносяться до цієї системи координат. Щоб отримати "сирі" дані в системі координат, використовуваний на об'єкті робіт (проектній системі), необхідно виконати трансформацію сканів, що виконується автоматично за допомогою алгоритмів керуючої програми, наприклад, можна об'єднувати сусідні скани за опорними точками, а можна об'єднувати за відомими лінійними та кутовими елементами орієнтування сканера [18].

2. Зшивання сканів в одну модель.

Найбільш складним і трудомістким етапом роботи в застосуванні НЛС є обробка знімальних даних. Об'єднання окремих сканів (зшивання) в єдине геометричне простір для отримання опису об'єкта зйомки. Зшивання (або реєстрація) являє собою зрівняння даних сканування з різних станцій, в єдину систему координат.

Існує кілька методів зшивання:

- зшивання за спеціальними плоским маркам-відбивачам (розклеюються на об'єкті та скануються окремо під час польового етапу);
- зшивання по маркам-сферам (аналогічно плоским маркам);
- зшивання по характерних точках (не вимагає на польовому етапі використання марок взагалі);
- автоматична підгонка (програмний спосіб зшивання, коли ітераційний алгоритм зміщує один скан щодо іншого і знаходить оптимальне положення щодо мінімального відстані між точками цих сканів);
- геопривязку (дає можливість прив'язати кожен скан або всі виміри в задану систему координат).

Для побудови великомасштабних планів оптимальним є перший спосіб. Хоча, на відміну від зшивання по характерних точках, він вимагає додаткової роботи в полі (розвішування і подальшого збирання марок); зшивання за спеціальними плоским маркам-відбивачам дає більшу точність зшивання, а також зменшує час камеральних робіт.

Автоматичне зшивання або зшивання за характерними точками не підходять для високоточних вимірювань через імовірнісне розташування вихідних точок сканування, що ускладнює точний контроль результатів зшивання. Проте ці методи залишаються єдиними доступними для зйомки об'єктів, на яких важко або неможливо розмістити світловідбивні мітки, як, наприклад, під час зйомки повітряного газопроводу, склепіння даху тощо. Перед передачею в САД-програми зшиті хмари точок

потрібно обробити. Це можна зробити за допомогою програмного забезпечення, такого як Cyclone, яке завдяки системі управління рівнем деталізації (Level of Detail) дає можливість ефективно обробляти сотні мільйонів точок. Існують програмні інструменти, що дають змогу виділити шар точок, які знаходяться у певному перетині хмари точок і на заданій відстані від нього. На основі відфільтрованої хмари точок, що лежить у такому шарі, можна отримати векторні зображення об'єктів, спроектувавши залишені точки на площину перетину і з'єднавши сусідні точки прямими відрізками (рис. 7.7) [18, 33].

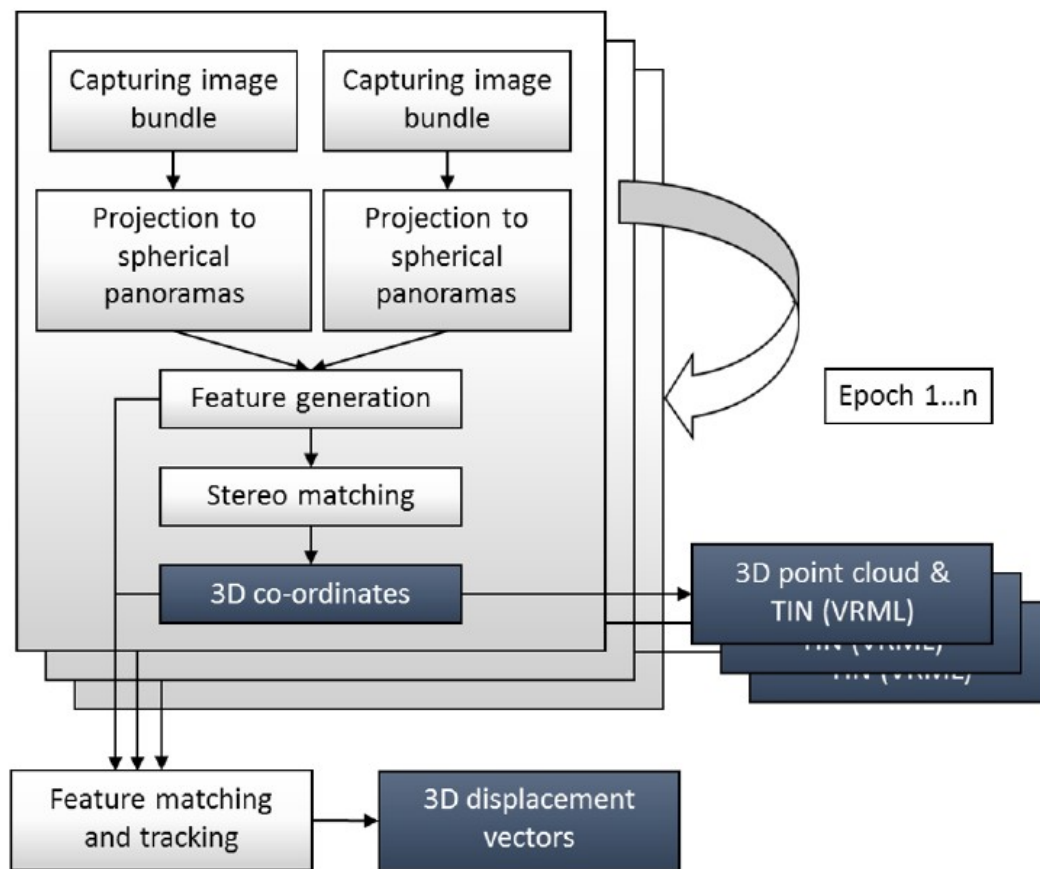


Рис.7.7 UML-діаграма послідовності опрацювання
геопросторових даних [33]

Отримане векторне зображення об'єктів піддається подальшій обробці з метою створення планів, які включають в себе відображення конструкцій, розмірів та іншої технічної інформації у встановлених умовних позначеннях, що використовуються в технічній інвентаризації в CAD-програмах. Висока ефективність збору просторових даних про об'єкти дає можливість вважати наземне лазерне сканування дуже

перспективним методом для отримання інформації під час організації моніторингу складних інженерних споруд [18].

3. Чистка хмари точок

Чистка хмари точок в наземному лазерному скануванні - це процес обробки сирого набору даних, отриманих від лазерного сканера, для видалення шуму, артефактів та непотрібної інформації з метою поліпшення якості та точності даних. Чистка хмари точок включає в себе:

- фільтрація шуму;
- видалення аутлаєрів;
- видалення непотрібних областей;
- сегментація;
- корекція геометричних артефактів;
- нормалізація інтенсивності точок;

Майбутня побудова моделі об'єкту виконується згідно з логічним визначенням приналежності кожної точки чи групи точок до певної поверхні чи елемента та створення по даним точкам відповідного елемента. Цей фінальний етап залежить від поставлених цілей - у якому вигляді мають бути представлені дані по результатам наземного лазерного сканування.

Для початку необхідно опрацювати дані лазерного сканування, а саме об'єднати та відфільтрувати отримані скани в хмару точок, що буде охоплювати дослідну територію. Для цього обрано програмне забезпечення CloudCompare. Це відкритий застосунок для роботи з хмарами точок, що дає можливість реєструвати хмари, розраховувати нормалі, здійснювати статистичний аналіз тощо. Він успішно поєднується з різними форматами даних, що полегшує комбінації з іншим програмним забезпеченням [18].

Особливістю взаємодії з Autodesk AutoCAD, в якому буде здійснюватися подальше оброблення даних, є те, що CloudCompare не працює з форматами *.dwg чи *.dxf. Але можливо експортувати 3D модель з CloudCompare в форматі *.stl або *.fbx.

Для зшивки сканів завантажуюмо їх до програмного забезпечення. CloudCompare працює з 32-бітними значеннями чисел, що значно збільшує швидкість опрацювання даних та зменшує розмір файлу. Тому під час відкритті програма аналізує вихідний файл та вказує що координати надто великі, тому вона пропонує зсунути їх, щоб працювати в локальній системі координат (рис. 7.8).

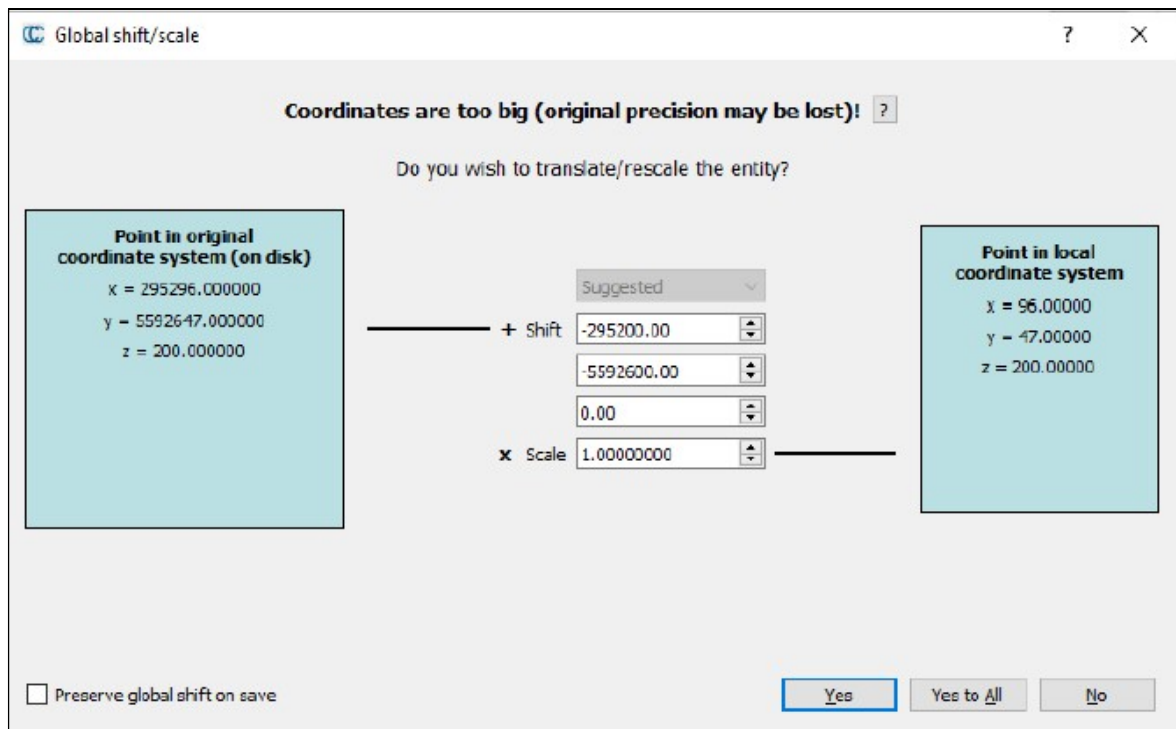


Рис. 7.8. Вікно перетворення координат [18]

Далі виконується безпосередньо зшивка сканів та їх об'єднання. У результаті отримуємо хмару з 122 670 765 точок (рис. 7.9).

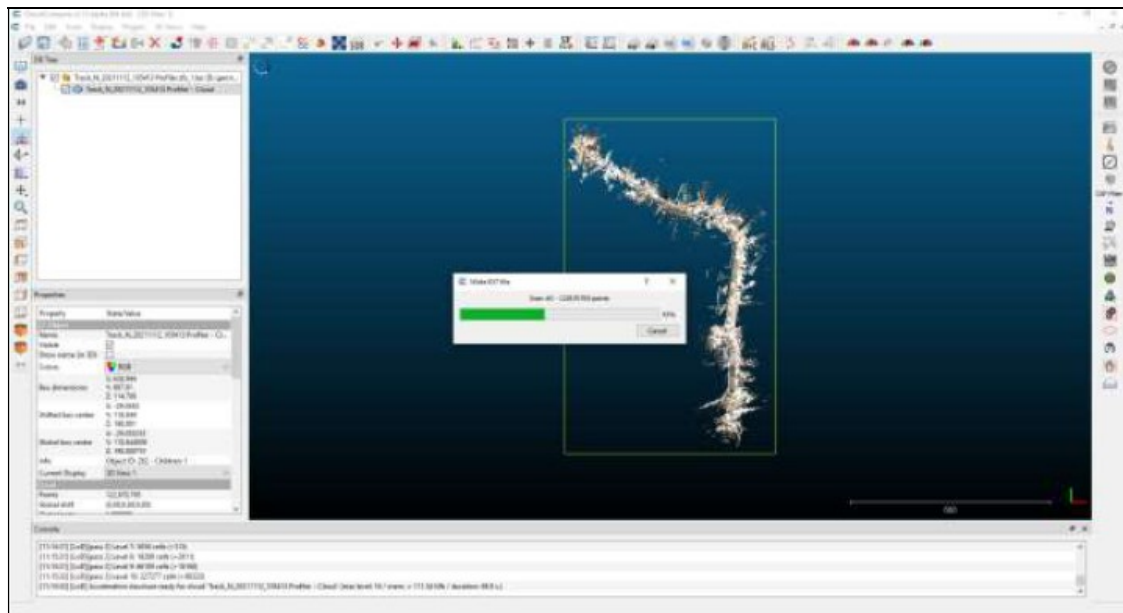


Рис.7.9. Інтерфейс ПЗ для опрацювання сканів [18]

Вихідні файли знаходяться у форматі *.las, а після обробки обираємо експорт в форматі *.e57, для подальшого оброблення в програмному забезпеченні Autodesk ReCap. (

Також програмне забезпечення дає можливість створити просте моделювання поверхні землі регулярною сіткою (GRID). Таким чином створено цифрову модель місцевості за допомогою програмного застосунку CloudCompare. А саме: виконано сегментацію хмари точок, та побудовано модель рельєфу у вигляді полігональної поверхні (рис. 7.10).

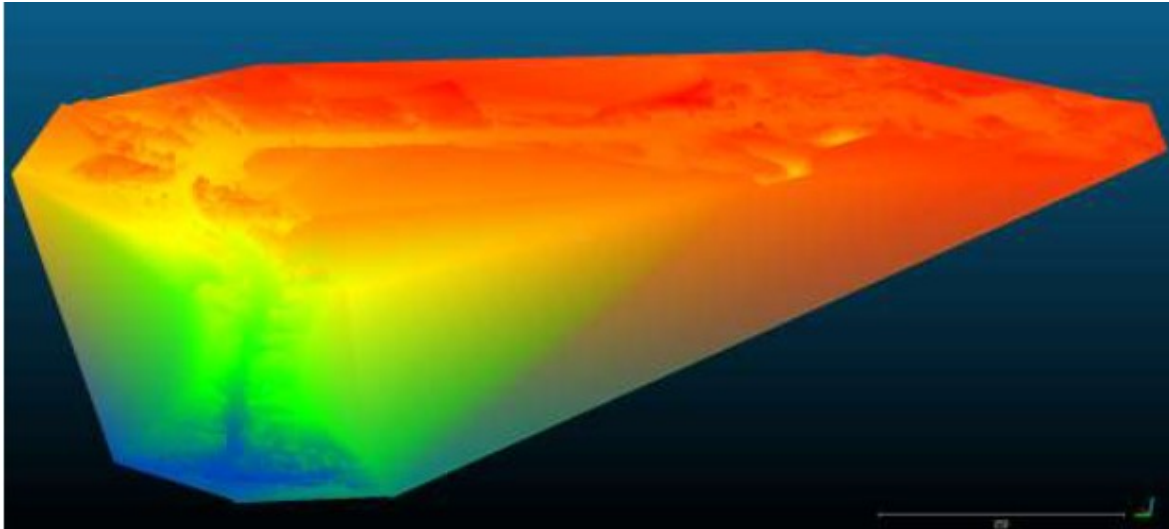


Рис. 7.10. Результат побудови ЦМР об'єкта робіт [18]

Autodesk ReCap – ще один продукт компанії Autodesk, призначений для опрацювання хмар точок, він дає можливість імпортувати дані для перегляду і редагування. В даному випадку програмне забезпечення застосовується для інтегрування зшитої хмари в інший продукт Autodesk – AutoCAD, способом перетворення вихідних даних хмар точок з формату *.e57 в індексовану хмару формату *.rcp.

Створюємо новий проект та обираємо шлях для його збереження, далі імпортуємо до проекту хмару в форматі *.e57.

Після імпорту здійснюється індексація хмари точок. Вигляд готової хмари точок представлений на рис. 7.11.

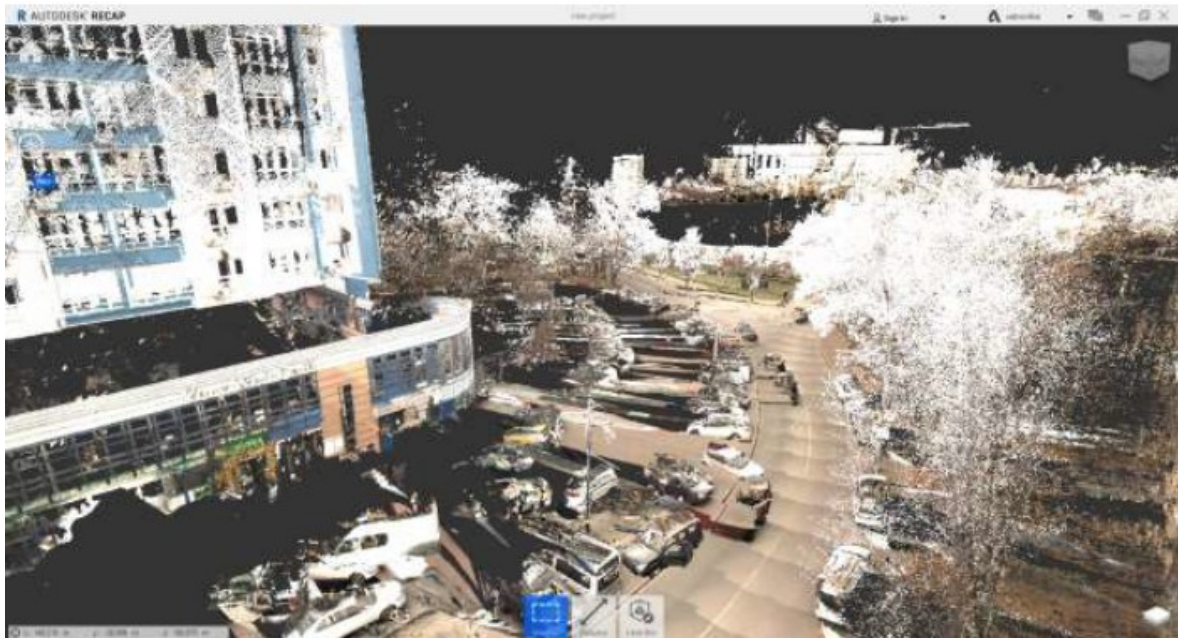


Рис. 7.11. Вигляд готової індексованої хмари точок [18]

Програмний застосунок підтримує кілька методів відображення хмар точок. Програма класифікує точки за різними параметрами, наприклад:

- 1) за інтенсивністю відбитого лазерного променя (рис. 7.12.а);
- 2) за висотою (рис. 7.12.б);
- 3) за нормальми до поверхні (рис. 7.12.в);
- 4) реальні кольори точок з фотографії (рис. 7.11).

У режимі за нормальми ReCap аналізує кривину поверхонь, і зафарбовує по різному орієнтовані різні поверхні. В такому режимі найкраще виділяються ребра поверхонь, тож під час опрацювання хмари зручніше використовувати саме цей режим відображення.

Також програма дає можливість змінювати розмір точок, редагувати хмару способом обрізання виділених частин.

Після такої обробки хмара готова до подальшого експорту в програмне забезпечення AutoCAD.

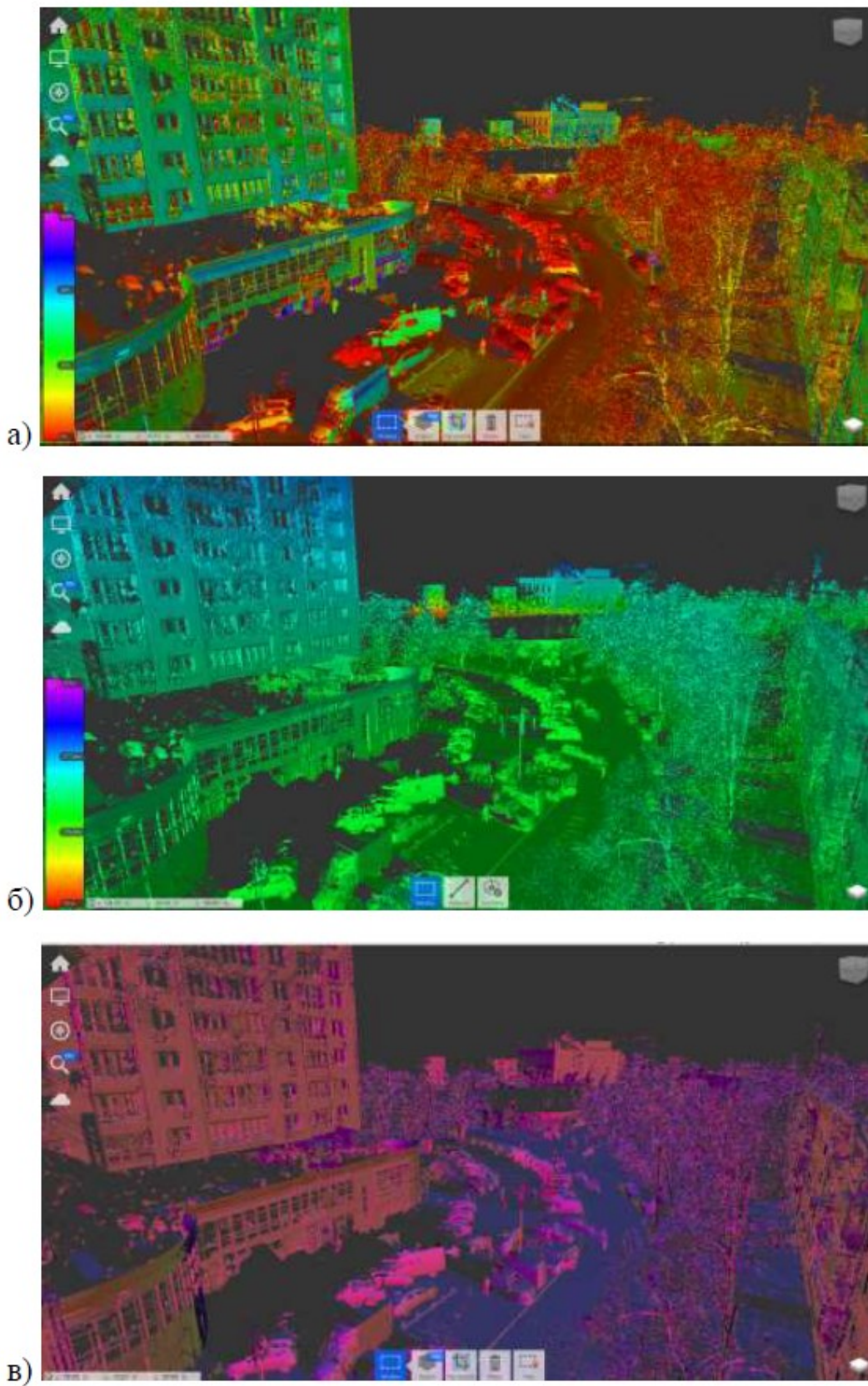


Рис. 7.12. Режими відображення точок [18]

Результати робіт та вихідні дані надані товариством з обмеженою відповідальністю SPM3d.

Сфери застосування даних лазерного сканування. За сферою застосування сканерів класифікують [11]:

- фасадні сканери мають перевагу в далькості і швидкості вимірювань, але мають обмежену зону сканування. Основна сфера застосування фасадних 3D сканерів - знімання відкритих ділянок місцевості і зовнішньої поверхні великомасштабних об'єктів (фасадів будівель і споруд), яка виконується зазвичай з декількох станцій.

- інтер'єрні сканери мають максимально широку зону сканування, але поступаються за далькістю вимірювань, тому зазвичай застосовуються для знімання інтер'єрів або невеликих замкнутих просторів (тунелів, печер тощо).

Наземне лазерне сканування як спосіб відображення місцевості і реальної поверхні об'єктів у вигляді їхнього тривимірного зображення разом із електронними тахеометрами та системами GPS успішно використовують у таких сферах: інженерна геодезія; знімання промислових об'єктів з великою кількістю комунікацій, атомні, теплові, гідроелектростанції, знімання автомобільних і залізничних шляхів, мостів, знімання та профілювання тунелів та іншій гірській промисловості; визначення об'ємів гірських порід, які видобуто у результаті вибуху або запасів сировини, 3D-моделювання відкритих кар'єрів та підземних шахт, маркшейдерський супровід бурових робіт та будівництво і проектування родовищ корисних копалин. Лазерне сканування забезпечує принципово нові можливості для визначення об'ємів гірських порід. За рахунок високої густини точок та точності визначення просторових координат поверхні гірських порід точність визначення об'ємів становить 0,5 %. Час роботи порівняно з традиційними методами зменшується в десятки разів.

- Архітектура: архітектурні обміри, геодезичне забезпечення проектування і монтажу фасадних конструкцій; контроль деформацій; 3D-моделювання будівель, вулиць і кварталів; складання детальних планів і 2D-креслень; моніторинг фасадів; створення та відновлення виконавчої документації та створення робочих креслень.

- Будівництво та експлуатація споруд: 3D-моделювання; коригування проекту в процесі будівництва; оптимальне планування і контроль переміщення монтажні роботи; моніторинг стану об'єкта під час експлуатації; відновлення втрачених креслень.

– Управління дорогами: знімання дорожнього полотна, створення 3Б-моделі рельєфу; проектування, реконструкція і будівництво об'єктів інфраструктури; діагностика стану рейкової колії, будівництво під'їзних шляхів, контроль граничних величин відхилень, контроль верхнього стану автодоріг. 245

– Енергетика: знімання об'єктів (кабелі, опорні конструкції), створення 3Б-моделей, монтажні роботи; моніторинг стану об'єкта, контроль деформацій, складання планів і креслень.

– Інвентаризація об'єктів нерухомості.

Ще одним з важливих напрямів застосування технології лазерного 3D-сканування є знімання індустриальних об'єктів. Сьогодні в Україні складна ситуація, коли актуальні плани підприємств та заводів відсутні, оскільки більшість з них перепрофілювалися і повністю або частково змінили обладнання після розпаду Радянського Союзу. Технічна документація часто втрачена або де-факто застаріла. Тільки метод лазерного сканування дасть змогу швидко створити повний комплекс документації про геометрію об'єктів та застосовувати ці дані для моделювання і модернізації.

Контрольні запитання

1. З яких основних частин складається лазерний сканер?
2. Які існують типи лазерних сканерів?
3. Що представляє собою хмара точок?
4. Які програмні засоби використовуються для опрацювання матеріалів лазерного сканування?
5. Які завдання можна виконувати за допомогою лазерних сканерів

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. ОСНОВИ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ПРОГРАМНІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Лекція 11. Інтерферометричні методи. Супутникове позиціонування

Інтерференція і когерентність. З курсу фізики відомо, що під час накладення двох когерентних хвиль однакової поляризації відбувається їх інтерференція, тобто взаємне посилення в одних точках простору і ослаблення в інших, залежно від різниці їх фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ в цих точках. Якщо в яку-небудь точку приходять дві хвилі з інтенсивностями I_1 і I_2 відповідно, то результуюча інтенсивність в цій точці визначається виразом:

$$I_{рез} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \gamma \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (8.1)$$

де множник γ відображає ступінь когерентності хвиль. Когерентність хвиль визначає здібність їх до інтерференції. Нагадаємо, що когерентність – це узгодженість параметрів. У вступі ми приводили таке визначення: когерентні хвилі — це хвилі однакової частоти, між якими зберігається постійна різниця фаз (тобто вони злагоджені за фазою). Ця постійність може розглядатися в просторі і в часі, у зв'язку з чим говорять про просторову і часову когерентність. Для характеристики часової когерентності вводять поняття часу когерентності τ_k – часу, протягом якого практично зберігається постійність різниці фаз. Якщо в деяку точку приходять дві просторово когерентні хвилі (наприклад, дві хвилі, випущені з однієї і тієї ж точки джерела і що пройшли по різних шляхах), то інтерференція спостерігається тільки у тому випадку, коли запізнювання τ однієї хвилі щодо іншої не перевищує часу когерентності τ_k . Щоб ця умова виконувалася, різниця ходу хвиль повинна бути не більш $L_k = v\tau_k$, де v – швидкість розповсюдження хвиль. Величина L_k називається довжиною когерентності і є тією максимально можливою різницею ходу, для якої ще може спостерігатися інтерференційна картина.

Практичним критерієм ступеня постійності різниці фаз, тобто мірою ступеня когерентності, є контраст (видимість, різкість, чіткість) інтерференційних смуг — найважливіший параметр інтерференційної картини. Якщо умова $\varphi_2 - \varphi_1 = const$ не дотримується, то, як видно з

рівняння (9.1), змінюється і результуюча інтенсивність $I_{рез}$, що приводить до "розмиття" інтерференційних смуг – зменшенню контрасту. В загальному випадку контраст визначається виразом:

$$K = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}), \quad (8.2)$$

де $I_{\max}$ та $I_{\min}$ — інтенсивності в центрі світлої і темної смуг відповідно.

Тоді:

$$0 < K < 1. \quad (8.3)$$

Крайні значення відповідають граничним випадкам повної некогерентності ($K = 0$) і повної когерентності ($K = 1$) коливань, ніколи строго не реалізовувалось на практиці. В будь-якій реальній ситуації ми маємо справу з проміжними випадками часткової когерентності. Значення величини γ в рівнянні (8.1) полягає в тому, що вона дає інформацію про контраст інтерференційної картини. У разі рівності інтенсивностей хвиль ($I_1 = I_2$), що інтерферують, значення γ безпосередньо дорівнює величині контрасту K . Отже, для утворення інтерференційної картини різниця ходу хвиль не повинна перевищувати довжини когерентності, залежну від часу когерентності. Час когерентності τ_k є параметром джерела випромінювання і дорівнює зворотній величині ширини його спектру: $\tau_k = 1 / \Delta\nu$. Чим вузьче спектр, тобто чим вище ступінь монохроматичності джерела, тим більше час когерентності. Звичайні (не лазерні) джерела світла випромінюють широкий спектр, і час когерентності у них малий. Відповідно мала і довжина когерентності. Для білого світла вона складає 2-3 мкм, для стандартних "монохроматизованих джерел", що використовуються в спектроскопії — приблизно 30 см, а для лазерів з їх надзвичайно вузьким спектром довжина когерентності може досягати сотень кілометрів. Проте такі значення для лазерів виходять тільки у вакуумі; на практиці вони не реалізовувались через оптичну нестабільність земної атмосфери, обумовлену турбулентністю повітря.

Практично довжина когерентності лазерного випромінювання в атмосфері знижується до сотень і навіть (в несприятливих умовах) десятків метрів. Максимальна різниця ходу, для якої експериментально спостерігалася інтерференційна картина, складає близько 500 м.

В радіодіапазоні час когерентності є абсолютно іншим по порядку

величини, ніж для оптичних хвиль. Час когерентності визначається стабільністю частоти генератора радіохвиль, і в стабілізованих по частоті генераторах може досягати десятків хвилин і навіть годин. За хвилину електромагнітна хвиля проходить 18 млн. км, і довжина когерентності радіохвиль виражається астрономічними цифрами. Це говорить про те, що інтерференція радіохвиль може спостерігатися для будь-якої різниці ходу.

Загальні принципи лазерної інтерферометрії. Можливість вимірювання відстаней на основі інтерференції світлових хвиль виходить безпосередньо з формули (8.1), якщо в ній замінити різницю фаз на відповідну їй різницю ходу $d_2 - d_1$:

$$I_{рез} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \gamma \cos [(2\pi/\lambda)(d_2 - d_1)], \quad (8.4)$$

де λ — довжина хвилі світла.

Формула (8.4) пов'язує спостережувану інтенсивність з різницею ходу інтерферуючих хвиль. Тому треба побудувати таку інтерференційну схему, в якій подвійна відстань, що вимірюється, входила б в різницю ходу інтерферуючих хвиль. Цій вимозі задовольняє відомий з оптики інтерферометр Майкельсона. Не торкаючись тут технічних деталей, нагадаємо його загальну принципову схему (рис. 8.1).

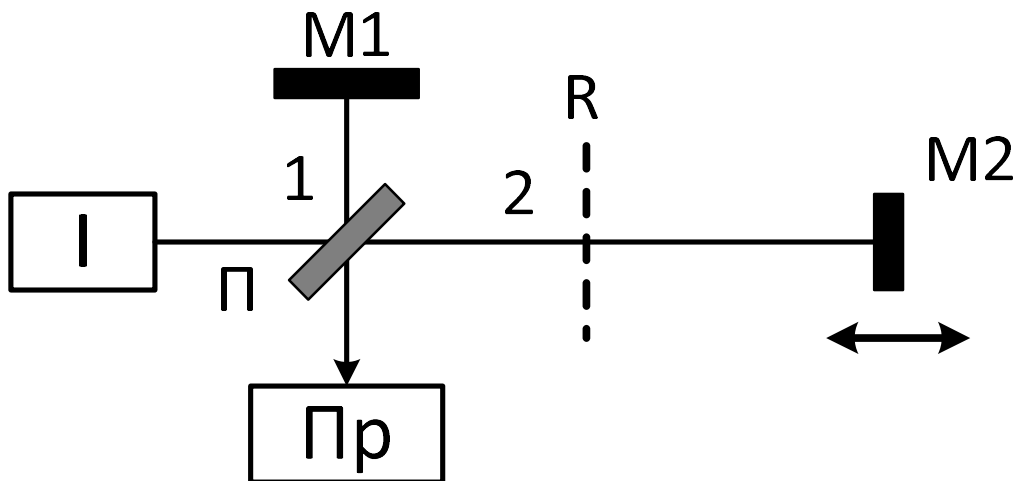


Рис. 8.1. Загальна схема інтерферометра Майкельсона

Світло від джерела I певної довжини хвилі розділяється напівпрозорою пластинкою Π на два пучки 1 і 2. Пучок 1 — опорний, пучок 2 — дистанційний. Опорний пучок відображається дзеркалом M_1 і

проходить через пластинку П, а дистанційний відображається дзеркалом M_2 і потім відображається пластинкою П, поєднуючись з опорним пучком. У разі поєднання пучків утворюється інтерференційна картина, реєстрована приймачем Пр. Буквою R на рис.8.1 позначена площа, віддалена від пластинки П на таку ж відстань, що і дзеркало M_1 . Якби дзеркало M_2 було встановлено так, щоб його відображуюча поверхня поєдналася б з цією площиною, то різниця ходу інтерферуючих пучків, була б рівна нулю. Таким чином, різниця ходу на малюнку складає $2RM_2$. Площина R називається референтною площиною.

Вид інтерференційної картини залежить від ступеня паралельності осей пучків і від розходження проміння в самих пучках. У разі строгого поєднання осей пучків спостерігається система чергування світлих і темних кілець. Чим менша кутова розходженість пучків, тим менше число кілець в полі зору; за умови дуже малого розходження, одна центральна пляма займає все поле. Якщо ж осі пучків, що інтерферують, не строго паралельні, то кільця перетворюються на смуги. Саме цей випадок реалізується на практиці.

В площині приймача світлі смуги утворюються в тих місцях, куди хвилі приходять у фазі (коли різниця ходу містить парне число напівхвиль світла) і усилиють один одного, а темні смуги – в тих місцях, куди хвилі приходять в протифазі (коли різниця ходу містить непарне число напівхвиль) і гасять один одного. Між смугами немає чітких меж; світла смуга плавно переходить в темну і навпаки. Відмітимо, що шириною інтерференційної смуги називають відстань між центрами світлих або темних смуг, тобто між максимумами або мінімумами інтенсивності.

Якщо дзеркало M_2 переміщати уздовж осі, то змінюватиметься різниця ходу, що, відповідно до рівняння (8.4), приводить до зміни результуючої інтенсивності у фіксованій точці поля інтерференції. Це виглядає таким чином, що вся система смуг почне рухатися – виникає інтерференційна картина, що "біжить". Під час зміщення дзеркала M_2 на $\lambda/2$ різниця ходу зміниться на λ , і на місці, скажімо, максимуму інтенсивності – центру світлої смуги – виявиться наступний максимум.

Іншими словами, картина зсувається на одну смугу у разі зсуву рухомого дзеркала на половину довжини хвилі світла. Якщо ми перемістимо дзеркало на деяку відстань D, то очевидно, що:

$$D = (\lambda / 2)p, \quad (8.5)$$

де p — кількість минувших інтерференційних смуг. Величина p називається порядком інтерференції і виражає собою число на півхвиль світла, що укладаються на відстані D . Це число в загальному випадку змішане, тобто:

$$p = N + \Delta N, \quad (8.6)$$

де N — ціле число ΔN — дріб, менший одиниці, і, отже:

$$D = (\lambda / 2)(N + \Delta N). \quad (8.7)$$

Таким чином, якщо λ — довжина хвилі в повітрі — відома, то задача вимірювання відстані зводиться до визначення порядку інтерференції шляхом підрахунку числа інтерференційних смуг під час переміщення дзеркала на всю довжину дистанції, що вимірюється. Для більшості застосувань достатньо визначити порядок інтерференції з точністю до цілого числа N .

Звернемо увагу на те, що вид формули (8.7) абсолютно ідентичний рівнянню фазової віддалеметрії $D = (\lambda / 2)(N + \Delta N)$. Проте між ними є принципова відмінність, що полягає в тому, що довжина хвилі λ — це довжина хвилі модуляції, а в (8.7) — довжина хвилі несучої, тобто самого випромінювання (світла). Визначення числа N в інтерферометрії — це, по суті, те ж визначення багатозначності, що і у фазовій віддалеметрії, але воно здійснюється тут принципово іншим способом — безпосереднім підрахунком у разі зміни вимірюваної довжини.

Як ясно з вищесказаного, число N змінюється на одиницю для зміни відстані на $\lambda/2$. Оскільки довжина хвилі світла мала, то число N може бути дуже великим. Наприклад, для відстані всього 1 м воно більше 106. Рахунок його проводиться фотоелектричним способом. Перед фотоприймачем встановлюється діафрагма шириною менше половини інтерференційної смуги, і у разі переміщення дзеркала, що створює інтерференційну картину, яка “біжить”, на виході фотоприймача виникає змінний електричний сигнал, число максимумів якого за час вимірювання підраховується підключеним до фотоприймача електронним лічильником.

Лазерні інтерферометри переміщень. Інтерферометри для лінійних вимірювань, побудовані на основі схеми Майкельсона,

отримали назву інтерферометрів переміщень, оскільки вони виміряють довжину, як величину переміщення рухомого дзеркала (відбивача).

В таких інтерферометрах як джерело світла використовують He-Ne лазер з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,63$ мкм, а плоскі дзеркала обов'язково замінюють кутовими відбивачами: по-перше, вони не критичні до невеликих розворотів, неминучих під час руху, а по-друге, відображений від них світло не потрапляє назад в лазер (як це має місце в схемі на рис. 8.2), що порушило б його роботу.

Лазерні інтерферометри можуть бути двох типів, що розрізняються тим, що за нерухомим відбивачем інтерференційна картина:

- 1) стаціонарна (нерухома);
- 2) нестаціонарна (що біжить або періодично гойдається).

В другому випадку на виході фотоприймача виникає змінний сигнал навіть за відсутності руху відбивача, що дає опорну частоту у разі вимірювання переміщень і дає можливість істотно поліпшити багато параметрів інтерферометра. “Гойдання” картини створюється звичайно фазовою модуляцією випромінювання в опорному плечі (модуляційні інтерферометри). Картина, що біжить, у разі нерухомого відбивача, виникає, якщо на приймачі інтерферують хвилі двох різних (достатньо близьких) оптичних частот. Це можна забезпечити застосуванням двочастотних лазерів або зсувом частоти одночастотного лазера за допомогою акустооптичних і інших пристроїв (гетеродинні інтерферометри). Таким чином, перший тип інтерферометрів (гомодинні інтерферометри) відповідає класичній схемі Майкельсона, а другий тип включає модуляційні і гетеродинні схеми.

Принцип побудови гомодинних інтерферометрів (інтерферометри першого покоління) ілюструється на рис. 8.2,а. В них використовується одночастотний стабілізований He-Ne лазер. Для забезпечення реверсивного підрахунку смуг є два фотоприймачі, реєструючі сигнали, зсунуті по фазі на 90° (на малюнку для простоти показаний тільки один фотоприймач).

Схему на рис. 8.2, а можна перетворити в модуляційну, вводячи фазову модуляцію випромінювання в опорному каналі шляхом закріплення опорного відбивача на п'єзокераміці, до якої підводиться змінна напруга від генератора. Це створює періодичну зміну різниці ходу в інтерферометрі, що накладається на постійну лінійну зміну різниці ходу, обумовлену рухом відбивача. Підрахунок смуг проводиться в

моменти, коли модулюючий сигнал проходить своє середнє положення, рівне нулю, і тому свідчення реверсивного лічильника завжди відповідають вимірюваному переміщенню.

Гетеродинний інтерферометр з двочастотним лазером будують по схемі, показаній в узагальненому вигляді на рис. 8.2, б. He-Ne лазер випромінює дві близькі оптичні частоти ν_1 і ν_2 , що рознесли на величину порядку 2 МГц, отримані розщеплюванням лазерної частоти ν_0 на дві компоненти під час приміщення активного середовища лазера в поздовжнє магнітне поле (ефект Зеемана).

Особливістю такого інтерферометра є наявність двох окремих каналів — опорного і сигнального. В опорному каналі обидві оптичні частоти прямують відразу на опорний фотоприймач, а в сигнальному каналі одна з частот прямує на нерухомий опорний відбивач, а інша — на дистанційний відбивач, після чого вони, пройшовши відповідні плечі інтерферометра, приходять на сигнальний фотоприймач. В такій схемі як на опорному, так і на сигнальному фотоприймачах виникає “біжуча” інтерференційна картина навіть під час нерухомого дистанційного відбивача. Це відбувається в результаті інтерференції двох різночастотних коливань з близькими частотами ν_1 і ν_2 , утворюючими сигнал биття — зміна інтенсивності з різницевою частотою. В такій схемі число N визначається як різниця двох чисел — показників лічильників в сигнальному і опорному каналах — таким чином.

Під час нерухомого дистанційного відбивача швидкість переміщення інтерференційних смуг перед опорним і сигнальним фотоприймачами однакова і чисельно дорівнює різницевої частоті $F = |\nu_1 - \nu_2|$ (F смуг в секунду).

Тому лічильники в опорному і сигнальному каналах реєструватимуть однакову кількість смуг за будь-який інтервал часу.

$$N = N_2 - N_1 = \int_{t_1}^{t_2} \Delta F dt. \quad (8.8)$$

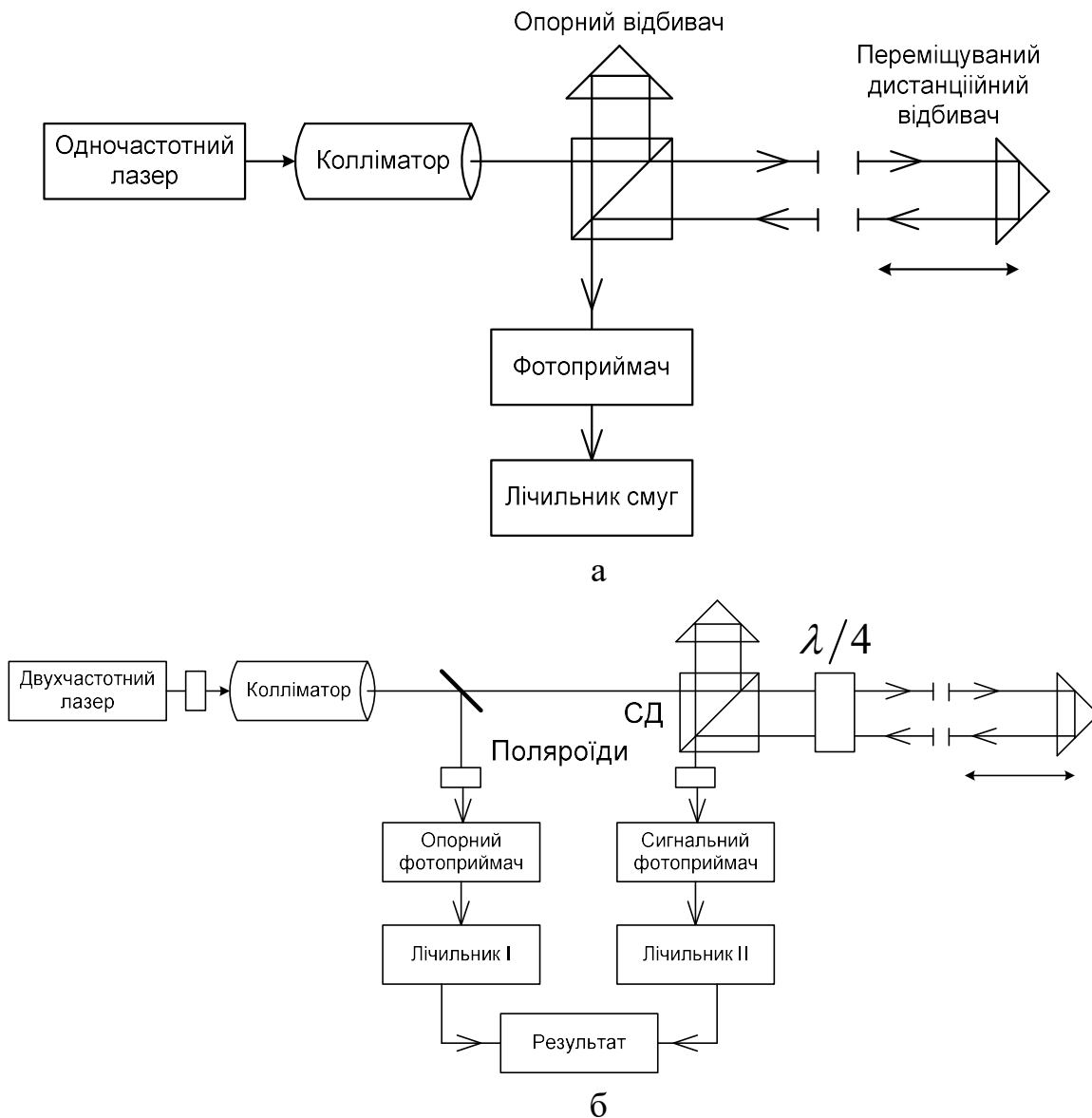


Рис. 8.2. Схема побудови лазерного інтерферометра
 а – з одночастотним лазером; б – гетеродинна схема
 з двочастотним лазером

Для руху дистанційного відбивача виникає доплерівський зсув частоти на сигнальному фотоприймачі, і швидкість переміщення смуг перед сигнальним фотоприймачем стає рівною $F \pm \Delta F$ смуг в секунду, де ΔF — величина доплерівського зсуву, рівна $2V/\lambda$ (V — швидкість руху відбивача), а знак перед ΔF залежить від напрямку руху. В цьому випадку кількість смуг, реєстрована лічильниками в опорному і сигнальному каналах за один і той же інтервал часу $\Delta t = t_2 - t_1$, буде різною — N_1 і N_2 , а їх різниця буде однакою. Тобто різниця показників лічильників в сигнальному і опорному каналах дорівнює інтегралу від доплерівського

зсуву частоти, або, іншими словами, інтерферометр здійснює інтеграцію доплерівського зсуву частоти за час вимірювання.

В загальному випадку відбивач рухається нерівномірно із швидкістю $V = V(t)$, і доплерівський зсув буде $\Delta F(t) = 2V(t)/\lambda$. Підставляючи його в останній вираз і враховуючи, що для нерівномірного руху $D(t) = \int V(t)dt$, знайдемо

$$N = \int_{t_1}^{t_2} \Delta F(t)dt = \frac{2}{\lambda} \int_{t_1}^{t_2} V(t)dt = \frac{2}{\lambda} [D(t_2) - D(t_1)] = \frac{2D}{\lambda}, \quad (8.9)$$

де D — пройдена відстань. Отримана величина не залежить від швидкості руху відбивача, і тому непостійність швидкості не впливає на результат вимірювань. Помноживши підраховане число N на $\lambda/2$, отримаємо відстань D .

Відзначимо, що і в “класичній схемі” з одночастотним лазером для руху відбивача виникає доплерівський зсув частоти $2V/\lambda$, і число N є інтеграл від цього зсуву за час вимірювання.

В сучасних інтерферометрах всі вимірювання автоматизовані, і остаточний результат видається на цифрове табло.

Лазерна інтерферометрія — найточніший метод лінійних вимірювань, з яким не можуть конкурувати ніякі інші методи.

Інструментальна погрішність складає менше 1 мкм. Результуюча точність методу лімітується погрішністю знання довжини хвилі. Ця погрішність залежить від стабільності оптичної частоти і точності визначення показника заломлення повітря. Типова відносна помилка інтерференційних вимірювань складає $5 \cdot 10^{-7}$.

Необхідність переміщення відбивача уздовж всієї дистанції, що вимірюється, вимагає спорудження точних направляючих, змонтованих на бетонних опорах, що технічно складно і дорого. Тому лазерні інтерферометри використовують на спеціально створюваних метрологічних базисах, що використовуються для калібрування електронних віддалемірів. Максимальна дальність дії промислових лазерних інтерферометрів складає 60 м, тому базиси роблять багатосекційними, і довжина їх може доходити до сотень метрів [1, 5].

Контрольні запитання

1. В яких віддальовірах використовується метод з одноразовим проходженням сигналу вздовж траси?
2. Як визначається максимальна різниця ходу, для якої ще можливе спостереження інтерференційної картини?
3. Що являється мірою ступеня когерентності?
4. В інтерферометрі Майкельсона випромінювання джерела ділиться світло дільником на два пучка. Через які елементи проходить опорний пучок?
5. Який параметр інтерференційної картини є мірою ступеня когерентності хвиль?
6. Що має найбільшу довжину когерентності?
7. В інтерферометрі з двочастотним лазером для руху відбивача виникає доплерівське зрушення частоти, яка дорівнює $2V/\lambda$. Що таке V ?
8. В яких інтерферометрах виникає інтерференційна картинка, що біжить, для нерухомого відбивача?
9. Чому дорівнює різниця показів лічильників смуг в опорному і сигнальному каналах двочастотного інтерферометра для руху відбивача?
10. Як визначити число N в інтерферометрах з двочастотним лазером?
11. Яке радіовипромінювання приймається в методі РНДБ?
12. Які риси характерні для РНДБ?

Лекція 12. Радіоінтерферометрія з наддовгою базою (РНДБ)

На відміну від оптичної інтерферометрії, реалізованої на коротких відстанях, метод РНДБ використовується для вимірювання дуже великих відстаней (до тисяч кілометрів) і є, в сукупності з лазерною супутниковою віддалеметрією, основним методом під час створення глобальної геодезичної мережі. В геодезію цей метод прийшов з радіоастрономії, де спостережною апаратурою, що використовується, є радіотелескоп.

Радіоінтерферометр складається з двох радіотелескопів, що рознесли на сотні або тисячі кілометрів і спостерігаючих один і той же квазар – квазізоряне позагалактичне джерело шумового радіовипромінювання з надзвичайно широким спектром. Квазари знаходяться на відстанях від Землі в десятки і сотні мільйонів світлових літ, тобто практично в нескінченності, і тому радіохвилі, що приходять від квазара мають ідеально плоский фронт, а сигнали, які поступають на обидва радіотелескопи йдуть по строго паралельних шляхах. Ці шумові сигнали абсолютно ідентичні, але приходять на радіотелескопи з деякою часовою затримкою τ щодо один одного, обумовленою різницею відстаней ΔS від радіотелескопів до квазара.

Геометрія РНДБ показана на рис.9.1. Лінію, що сполучає центри антен радіотелескопів 1 і 2, називають вектором бази D . Він є одним з основних визначуваних параметрів і може бути виражений через три різниці однойменних координат точок 1 і 2. З рис. 9.1 видно, що довжина вектора D дорівнює $\Delta S = \cos \beta$, а оскільки $\Delta S = v\tau$, то $v = (D/v)\cos \beta$, тобто затримка τ містить інформацію про довжину D . Ця затримка вимірюється кореляційним методом: на обох радіотелескопах шумові сигнали від квазара записуються на широкосмугові магнітофони (відеомагнітофони) і потім ці записи зводять разом на кореляторі, зсовуючи один запис щодо іншого до отримання максимуму кореляційної функції K_{12} , відповідного моменту $\tau = 0$.

Величина потрібного часового зсуву дає шукане значення затримки τ . Тоді вимірювання здійснюються тим точніше, чим вужче (гостріше) максимум кореляційної функції, а він тим гостріший, чим ширше спектр записуваних сигналів, тобто чим менше їх когерентність. Загальна схема реалізації РНДБ показана на рис. 9.1.

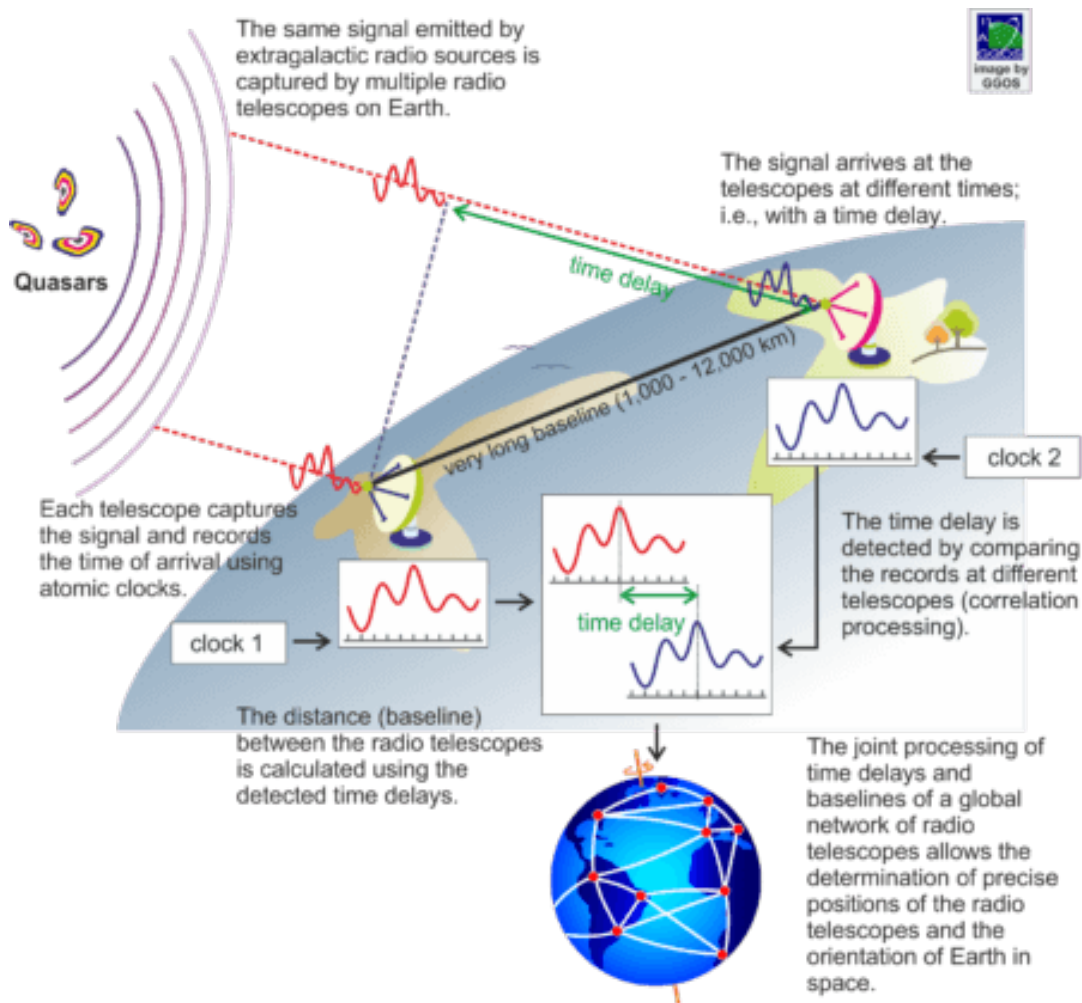


Рис. 9.1. Пояснення до методу РНДБ (<https://ggos.org/item/vlbi/>)

Через обертання Землі різниця ходу ΔS , а отже, і затримка τ періодично змінюється з деякою частотою. Цю частоту називають частотою інтерференції f . Вона пропорційна швидкості зміни затримки (тобто похідною $d\tau/dt$) і теж вимірюється. За вимірними величинами τ і f можна отримати різницю ходу ΔS і її зміну в часі. Величина ΔS є функцією радіус-векторів пунктів 1 і 2 і напряму на квазар. Не розглядаючи тут аналітичні співвідношення, відзначимо лише, що метод РНДБ дає можливість визначити довжину вектора бази з помилкою 2-3 см і напрям на квазар з точністю до 0,001 кутової секунди по обох кутових координатах.

Записи сигналів на радіотелескопах повинні бути прив'язаний до єдиної шкали часу, для чого годинник на обох станціях необхідно якомога точніше синхронізувати. Це здійснюється за допомогою місцевих незалежних стандартів частоти і часу, які контролюються по

високостабільному атомному еталону – водневому мазеру з відносною нестабільністю $2 \cdot 10^{-14}$ за добу. Мазер – це аналог лазера, що працює в радіодіапазоні на частоті $\approx 1,4$ ГГц (довжина хвилі 21 см), а нестабільність $2 \cdot 10^{-14}$ означає, що відхід такого “годинника” складає 0,4 секунди за мільйон років. Мітки часу записуються на магнітофони одночасно із записом радіосигналів на обох станціях РНДБ, і саме по зсуву однойменних міток визначають затримку τ для кореляційної обробки записів. У радіотелескопах використовуються повноповоротні параболічні антени, діаметр яких може складати від 20 до 70 метрів. Телескопи працюють в декількох окремих діапазонах частот, що охоплюють інтервал довжин хвиль від декількох міліметрів до майже одного метра. Приймальні системи радіотелескопів володіють дуже високою чутливістю. Щоб звести до мінімуму шуми усередині апаратури, підсилювачі сигналів, що приймаються, охолоджуються до температури 15 К.

З приводу РНДБ як інтерферометричного методу доречно відзначити наступне. Необхідно чітко уявляти собі, що, на відміну від розглянутого вище оптичного випадку, безпосередньої інтерференції радіохвиль в РНДБ не спостерігають, так як її просто нема. Вона була б, якби два сигнали від одного джерела, пройшовши різні шляхи, приходили на один приймач (телескоп), на якому і спостерігалася б інтерференція. Але ці сигнали приходять на два окремі телескопи, величезна відстань між якими не дає можливість безпосередньо накласти сигнали один на одного (як це робиться, наприклад, у відомому зоряному інтерферометрі Майкельсона за допомогою системи дзеркал). Про яку ж інтерференцію йдеться?

Річ у тому, що в результаті обробки ми одержуємо такий же результат, неначебто спостерігали інтерференцію на одному радіотелескопі з діаметром антени, рівним довжині бази D – відстані між двома радіотелескопами. Тому фактично ми маємо тут випадок, який можна назвати синтезованою інтерференцією, індикатором якої служить поява сигналу на виході корелометра за умови достатньо близького збігу записів. Цей сигнал у разі зсуву записів прописує кореляційну функцію, що має максимум за $\tau = 0$. У цей момент вхідні сигнали когерентні і вихідний сигнал корелометра аналогічний тому, який вийшов би безпосередній інтерференції широкосмугових сигналів, що поступають на антени двох радіотелескопів. Саме в цьому значенні слід розуміти

інтерференційний механізм РНДБ. Висока точність методу РНДБ обумовлена тим, що використання двох рознесених антен, дає роздільну здатність, еквівалентну такій же для однієї антени з величезною апертурою (діаметром), що дорівнює довжині бази. Станції VLBI є частиною міжнародної земної системи координат (The International Terrestrial Reference System – ITRS) та її реалізації (The International Terrestrial Reference Frame – ITRF) [13]. VLBI- та GNSS-технології дають змогу здійснювати геодезичний моніторинг земної поверхні, де строгі математичні моделі та застосування референц-еліпсоїду впливає на точність визначення координат (рис. 9.2).

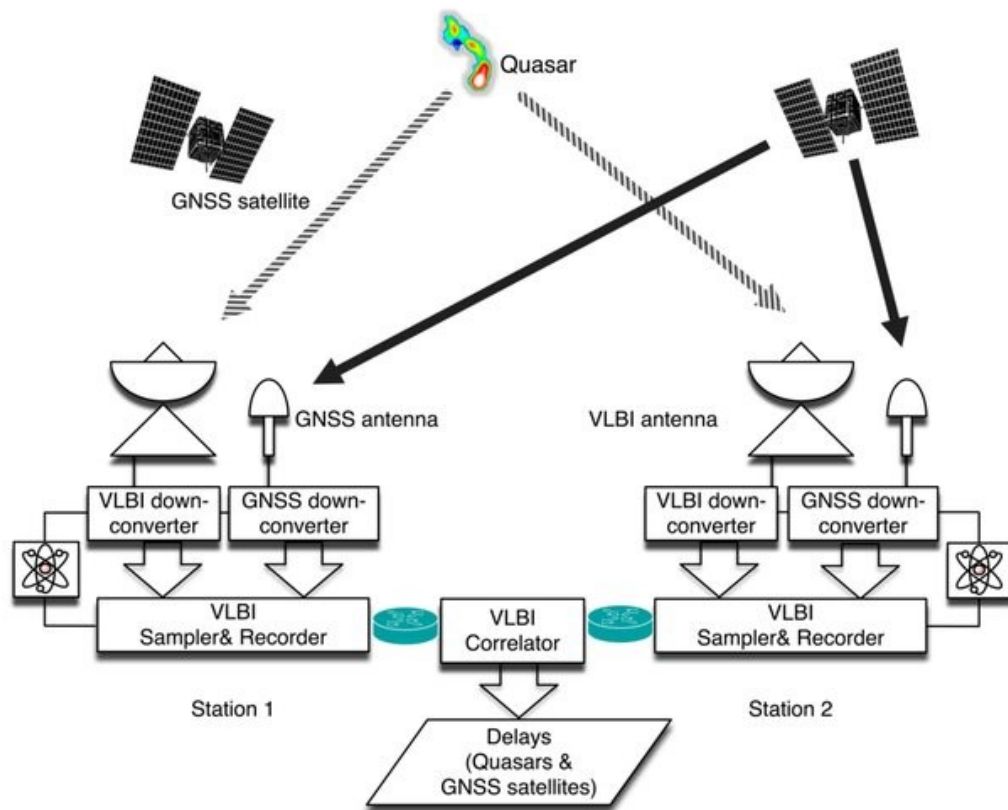


Рис. 9.2. Загальна схема реалізації методу РНДБ у поєднанні з методом GNSS [30]

На рис. 9.3 наведено базові лінії між радіотелескопами на територію Європи, визначення довжини яких було досліджено строгими числовими методами на референц-еліпсоїді. Мережа далекого космічного зв'язку NASA використовує інтерферометри VLBI з відстанню більше 10000 км, щоб побудувати радіо систему координат для навігації космічних апаратів [13], особливо в частині південної півкулі Землі.

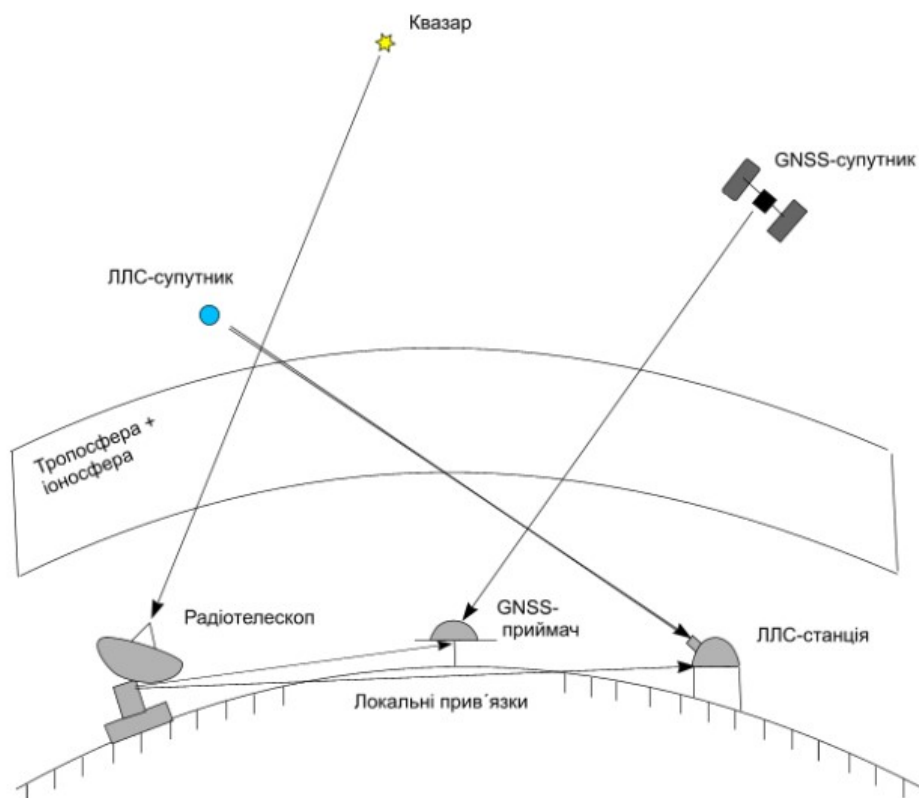


Рис. 9.3. Зв'язки між методами РНДБ, лазерної локації штучних супутників, глобальних радіонавігаційних систем [15]

Базові лінії, сформовані європейськими станціями IVS, які спостерігали більше п'яти сеансів. Довжини базових ліній (рис. 9.4, табл. 9.1) та їхні середньоквадратичні відхилення визначені на епоху 01.01.2009 р [85]. Радіоінтерферометрія з наддовгою базою, крім створення глобальної геодезичної мережі, використовується для вирішення багатьох задач геодезичного і геофізичного характеру (під час визначення параметрів обертання Землі, вивченні руху літосферних плит, дії приливних сил тощо) [17].

Таблиця 9.1

Перелік базових ліній від станції Сімеїз [85]

Назва базової лінії	Довжина прямої, мм	СКП, мм
Simeiz/ Madrid	3117042125,0	0,9
Simeiz/ Matera	1472857706,7	0,6
Simeiz/ Medicina	1766185783,9	0,6
Simeiz/ Metsähovi	1866587991,7	1,1
Simeiz/ Noto	1798600353,3	0,6
Simeiz/ Ny Älesund	3896968734,9	1,0

Назва базової лінії	Довжина прямої, мм	СКП, мм
Simeiz/ Onsala	2093576822,6	0,7
Simeiz/ Svetloe	1810877604,5	0,9
Simeiz/ Wettzell	1684604515,5	0,6
Simeiz/ Yebes	3023893871,0	0,9
Simeiz/ Zelenchukskaya	610832160,4	1,2

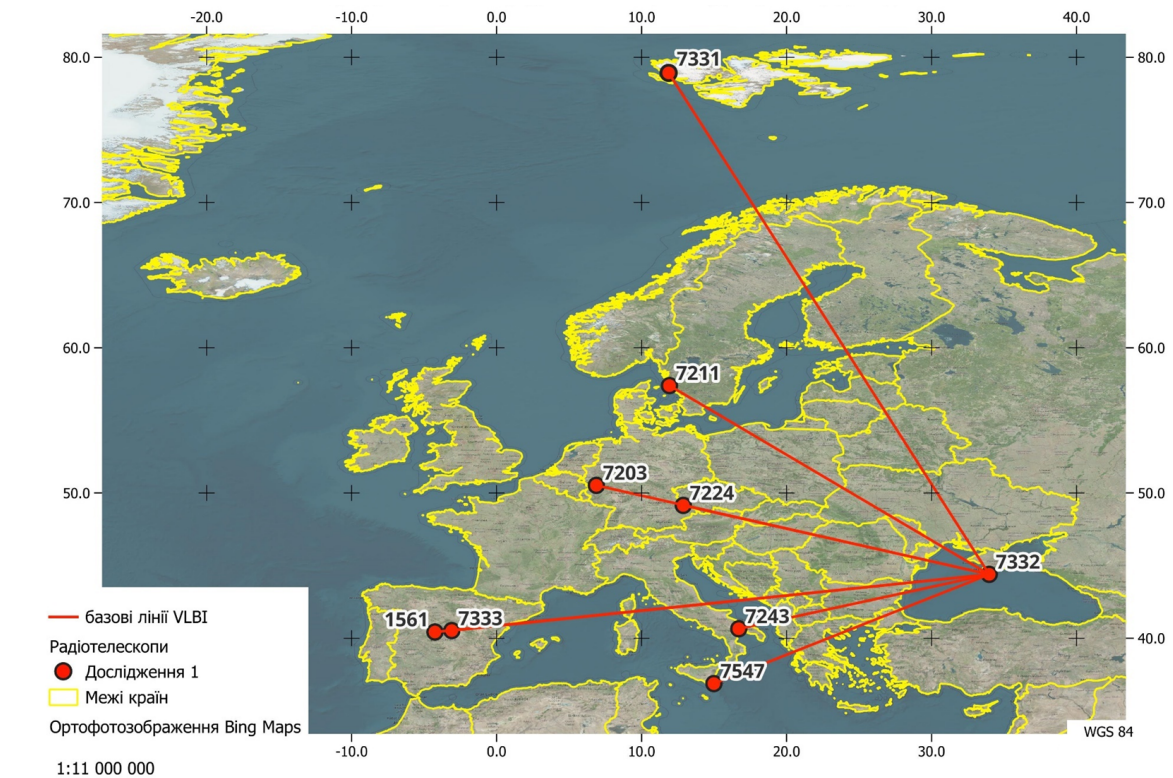


Рис. 9.4. Карта розташування радіотелескопів VLBI

Контрольні запитання

1. Які параметри вимірюються в РНДБ?
2. За якої умови точність вимірів затримки між сигналами, які потрапляють на два радіотелескопа, найбільш висока?
3. З якою помилкою визначається довжина вектора бази в методі РНДБ?
4. Яка безпосередня інтерференція радіохвиль в РНДБ?
5. Чим обумовлена висока точність методу РНДБ?

Лекція 13. Супутникове геодезичне обладнання

Основи супутникових навігаційних систем. Супутниковим позиціонуванням називають визначення місцеположення (координат в просторі) наземного пункту, нерухомого або об'єкта, що рухається, за допомогою супутникових навігаційно-геодезичних систем (СНГС). У випадку, коли об'єкт рухається, визначається, окрім координат, вектор його швидкості (тобто швидкість і напрям руху), а також здійснюється прив'язка до еталонних шкал часу.

Розроблення систем супутникового позиціонування почалася в кінці 50-х років XX сторіччя, незабаром після запуску першого радянського штучного супутника Землі. Цей супутник був запущений в 1957 році, а вже в грудні 1958 р. в США було розпочато програму створення супутникової навігаційної системи NNSS (Navy Navigation Satellite System), яка призначена для військово-морського флоту США. Пізніше ця система отримала назву "Транзит" (TRANSIT). Вона була здана в експлуатацію в 1964 році, а з 1967 р. була відкрита для цивільного комерційного використання. Система "Транзит" містила 6 супутників, виведених на майже кругові полярні орбіти з середньою висотою порядку 1075 км, і наземний командно-вимірювальний комплекс з чотирма станціями спостереження. Апаратура споживачів — приймально-індикаторний пристрій або, простіше, приймач — могла встановлюватися на необмеженій кількості рухомих об'єктів (необов'язково на кораблях). "Транзит" — система доплерівського типу, в якій координати приймача одержують за декількома різницями відстаней від приймача до різних положень супутника під час його руху, визначаючи ці різниці з інтеграції доплерівського зсуву частоти. Система "Транзит" зіграла дуже велику роль в навігації, її послугами користувалися тисячі споживачів в різних країнах. Здобула популярність також доплерівська система "Геос" (GEOS). В СРСР в 1967р. було розпочато розроблення доплерівської системи "Цикада", яка була введена в експлуатацію в 1979 р.

Всі ці системи забезпечували точність отримання координат порядку 50-100м, а в окремих випадках і більш високу. Головним їх недоліком була мала оперативність вимірювань: для досягнення високої точності було потрібно декілька проходжень ШСЗ в полі зору приймача, а перерви між проходженнями супутників, наприклад, в системі

"Транзит" складали півтори години. Це послужило спонукальним мотивом до розроблення систем другого покоління — глобальних супутникових систем.

Глобальні системи забезпечують отримання координат в будь-якій точці Землі в будь-який довільний момент часу і за будь-якої погоди. Це стало можливим завдяки збільшенню висоти орбіт супутників до 20 тис. км і збільшенню числа самих супутників до 24. Внаслідок цього в будь-якій точці на поверхні Землі може одночасно спостерігатися не менше 4-х супутників — мінімально необхідна кількість для визначення координат наземного приймача; практично дуже часто їх спостерігається більше, що дає можливість вибирати їх оптимальні конфігурації.

В даний час в світі існують дві глобальні системи: американська — GPS і російська — ГЛОНАСС. Обидві вони складаються з трьох секторів: космічного (супутники), наземного сектора управління і контролю та сектора користувача (супутникові приймачі). Більш детально структура та робота глобальних супутникових систем розглянуті в дисципліні GPS-технології.

Геометричні принципи позиціонування. Будь-яка точка в просторі характеризується, як відомо, трьома координатами, які можуть бути лінійними, кутовими або змішаними. Існує декілька різних систем просторових координат, що детально вивчаються в курсі вищої геодезії.

В супутниковій геодезії найзручнішою є геоцентрична (тобто з початком в центрі мас Землі) прямокутна система координат X, Y, Z . Зв'язок між цією системою і широко вживаною у вищій геодезії системою геодезичних (просторових еліпсоїдних) координат B, L, H (геодезичних широти, довготи і висоти) встановлюється за відомими формулами. В якій би системі координат не розглядалася дана (визначувана) точка простору, перш за все треба визначити її місцеположення по відношенню до інших точок, координати яких відомі, за допомогою вимірювань деяких геометричних величин, лінійних або кутових. Оскільки електронними методами відстані вимірюються точніше, ніж кути (в тому значенні, що дають змогу побудувати більш точні геодезичні мережі), то природно вибрати для вимірювання лінійні, а не кутові величини. Тоді просторове положення точки можна отримати методом лінійної засічки. Пояснимо сказане, розглянувши спочатку для простоти ситуацію на площині. Нехай точки A і B (рис. 10.1) з відомими координатами (геодезисти називають такі точки "твердими пунктами"),

P — визначувана точка. Для знаходження її місцеположення на площині треба виміряти відстані від неї до точок A і B , тобто AP і BP . Тоді точка P виходить в перетині двох кіл з радіусами AP й BP . (Ці кола перетинаються в двох точках — друга точка лежить на малюнку знизу від лінії AB , але на практиці ми завжди можемо правильно вибрати потрібну точку).

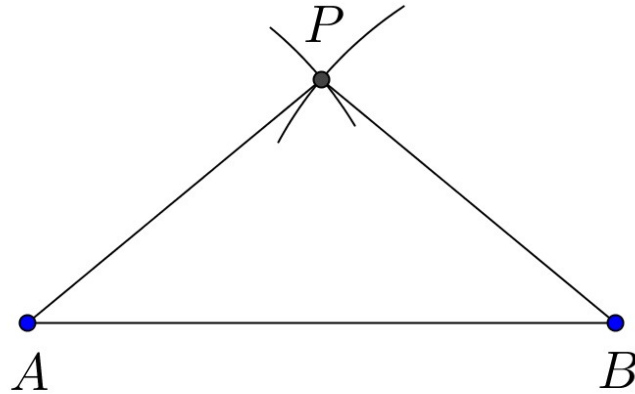


Рис. 10.1. До визначення місцеположення точки на площині круговою засічкою

Кола є ізолініями (так називаються лінії рівних значень вимірних величин) — лінії рівних відстаней від центру кола. Отже, в цьому випадку вимірювання двох відстаней від відомих точок до визначуваної дає положення останньої в перетині двох кругових ізоліній. Чим ближче до 90° кут засічки, тим вище точність. Оскільки вимірюються відстані (дальності), такий метод визначення місцеположення називається віддалемірним.

Окрім кругової, можлива також гіперболічна засічка, для здійснення якої треба виміряти дві різниці відстаней від трьох твердих точок A , B і C до визначуваної: $(AP-BP)$ й $(CP-BP)$. Ці різниці дають дві гіперболи: одну з фокусами в A і B , іншу — з фокусами у B і C , і визначувана точка P виходить в перетині гіпербол. Такий метод називають різницеvim.

Під час переходу від площини до простору ізолінії замінюються ізоповерхнями, і їх необхідно вже не дві, а три, тобто число вимірюваних геометричних параметрів — відстаней або різниць відстаней — повинне дорівнювати трьом. Під час віддалемірного методу замість кіл одержуємо сфери, і визначувана в просторі точка виходить в перетині трьох сферичних поверхонь. Перетин двох сфер дає коло, а третя

сферична поверхня перетинає це коло в двох точках, одна з яких i є визначуваною. По трьох вимірних віддальх D , ($i = 1,2,3$) координати визначуваної точки X , Y , Z обчислюються з рішення трьох рівнянь (рівнянь сфери) вигляду:

$$D_i = \left[(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2 \right]^{1/2}, \quad (10.1)$$

де X_i , Y_i , Z_i — відомі координати точок, від яких вимірювалися відстані (центрів сфер).

Особливості супутникового позиціонування. Застосовуючи вищевикладені геометричні принципи визначення місцеположення до глобальних супутникових систем, виникають деякі специфічні особливості. Одна з них полягає в тому, що "твердими пунктами" — точками з відомими координатами — є супутники, що рухаються, а визначувана точка (нерухома або рухома) знаходиться на Землі (супутниковий приймач). Для визначення положення (координат) наземної точки виконується одночасне вимірювання відстаней до супутників, а положення точки геометрично виходить в перетині сфер, як було пояснено вище, тобто використовується віддалемірний метод. Інша особливість полягає в тому, що з причин, які будуть розглянуті нижче, що вимірювані дальності виходять викривленими. Їх називають псевдодальностями. Щоб правильно обчислити координати приймача за вимірними псевдодальностями, їх треба виміряти не до трьох супутників, а як мінімум до чотирьох. На практиці, як правило, використовується більша кількість супутників для отримання надлишкових вимірювань, що дають можливість підвищити якість остаточного результату і оцінити його точність, але з принципової точки зору достатньо чотирьох супутників.

Для визначення положення точки P вимірюють віддалі з цієї точки до чотирьох і більше космічних об'єктів — штучних супутників Землі, координати яких відомі (рис. 10.2). Для визначення системою GPS положення наземних пунктів, GPS-приймач встановлюють на пункті, координати якого визначають (на рисунку пункт P), приймач радіосигнали від ШСЗ, що мають відомі миттєві координати; приймач вимірює віддалі $R_1, R_2, R_3, \dots, R_i$ до супутників (не менше чотирьох). На GPS — приймач передаються координати супутників [11].

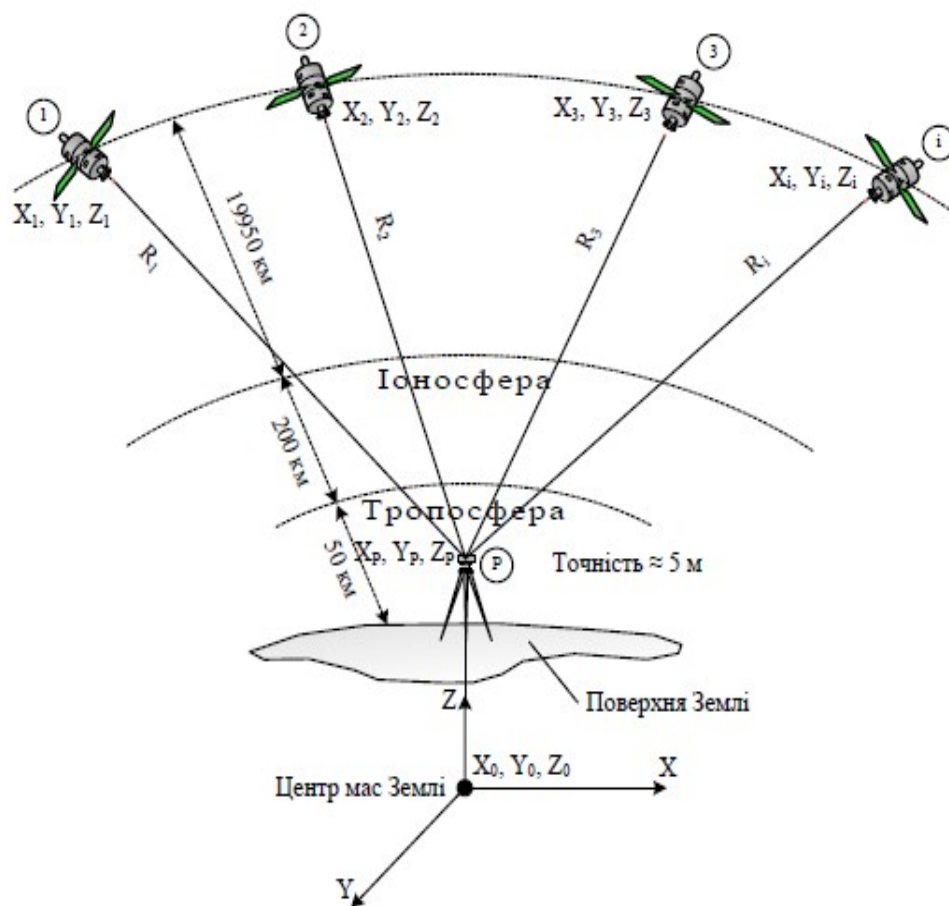


Рис. 10.2. Принципова схема визначення положення точки Р [11]

Системи координат для супутникового позиціонування. Вище вказувалось, що супутники є об'єктами з відомими координатами. Звідки беруться ці координати і що вони собою представляють?

До складу супутникової системи входить мережа наземних станцій стеження, які в результаті вимірювання відстаней до супутника одержують дані про елементи орбіти супутника через рівновіддалені інтервали часу в межах деякої ділянки траєкторії руху. Оброблення цих даних, які називаються ефемеридною інформацією або просто ефемеридами супутника, дає змогу обчислити для ряду моментів часу координати супутника в геоцентричній прямокутній системі координат.

Нагадаємо, що ця система визначається таким чином (рис. 10.3, рис. 10.4):

- початок координат О розташовано в центрі мас Землі;
- вісь Z направлена уздовж осі обертання Землі в точку середнього положення Північного полюса на епоху 1900-1905 рр. ("Міжнародний умовний початок");
- вісь X лежить в площині земного екватора і направлена в точку

- перетину цієї площини з Грінвіцьким меридіаном G ;
 – вісь Y доповнює систему до правої.

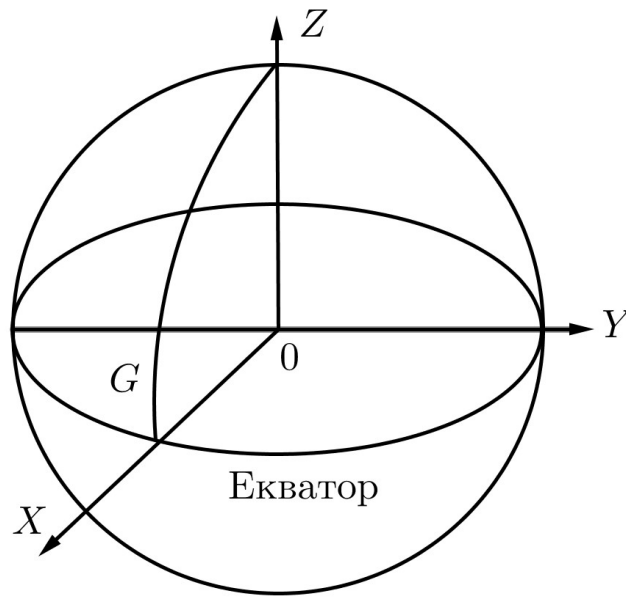


Рис. 10.3. Геоцентрична прямокутна система координат

GPS діє в геоцентричній системі координат, названих WGS-84 (World Geodetic System, 1984), а ГЛОНАСС — в геоцентричній системі ПЗ-90 (Параметри Землі, 1990).

Вказані системи координат близькі один до одного. Їх відмінність зводиться до невеликого розвороту систем щодо осі Z і зміщення початку координат по всіх трьох осях (рис. 10.4). Величини зміщення: $\Delta X = 1,1$ м; $\Delta Y = 0,3$ м; $\Delta Z = 0,9$ м.

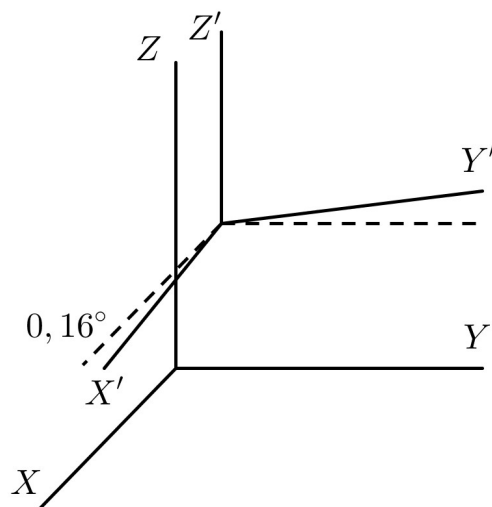


Рис. 10.4. Системи WGS-84 і ITRF2005

Точність GPS-вимірювань обумовлена цілим рядом джерел похибок як випадкового, так і систематичного походження (рис. 10.5) [11].



Рис. 10.5. Структура похибок, що виникають під час GPS-спостережень [11]

Для оцінки конфігурації сузір'я супутників введено спеціальні критерії, які визначаються коефіцієнтами погіршення точності Dilution of Precision (DOP). Вони є функціями кореляційної матриці вимірів, яка описує засічку антени приймача [11].

Серед критеріїв погіршення точності розрізняють наступні [11]:

- 1) GDOP – Geometric DOP (просторово-часовий параметр);
- 2) PDOP – Position DOP (просторове (координатне) положення);
- 3) HDOP – Horizontal DOP (планове положення);
- 4) VDOP – Vertical DOP (висотне положення);
- 5) TDOP – oTime DOP (одномірний часовий параметр).

Величина GDOP (Геометричний фактор пониження точності) допомагає змінити геометрію супутникового "сузір'я". Невелике значення $GDOP < 8$ свідчить про хорошу геометрію. Значення параметру $GDOP > 8$ свідчить про невдалу конфігурацію сузір'я супутників, що

відповідно значно погіршує точність отриманих в результаті спостережень координат. Спостереження проводять при значенні параметру $GDOP \leq 8$ на практиці як правило призначенні $GDOP \leq 6$ спостереження не проводять. У абсолютному методі приймач визначає координати і час, отримуючи сигнали супутників, незалежно від інших приймачів. Оскільки під час абсолютного методу точність вимірювань має субметрову точність (похибка позиціонування в межах 1 метра), то в геодезичних вимірюваннях він практично не використовується. У відносних (диференціальних) методах використовуються не менше двох приймачів, які вимірюють псевдовіддалі (табл. 10.1). Тоді один приймач, як правило, знаходиться на точці з відомими координатами. Його прийнято називати «базовим», а точку «базовою». Другий приймач знаходиться на точці, координати якої необхідно визначити. Такий приймач називають «роверним», а точку «роверною», або точкою знімання [11].

До абсолютного методу належить «Статика» (за умови використання одного приймача). До відносних (диференціальних) знімань відносяться: «Статика», коли використовуються два і більше приймачі одночасно (рис. 10.6, табл. 10.2) [11].

Таблиця 10.1

Співвідношення точності, тривалості спостережень та довжин векторів [11]

Метод	Віддаль між пунктами	Час сесії	СКП визначення координат
Статичний	до 20 км	близько 1 год	5мм+1ppm
Метод швидкої статики	до 10 км	5-10 хв.	5мм+1ppm
Метод напів-кінематичний ("стій/йди")	до 5 км	до 2 хв.	10-20 мм.+1ppm

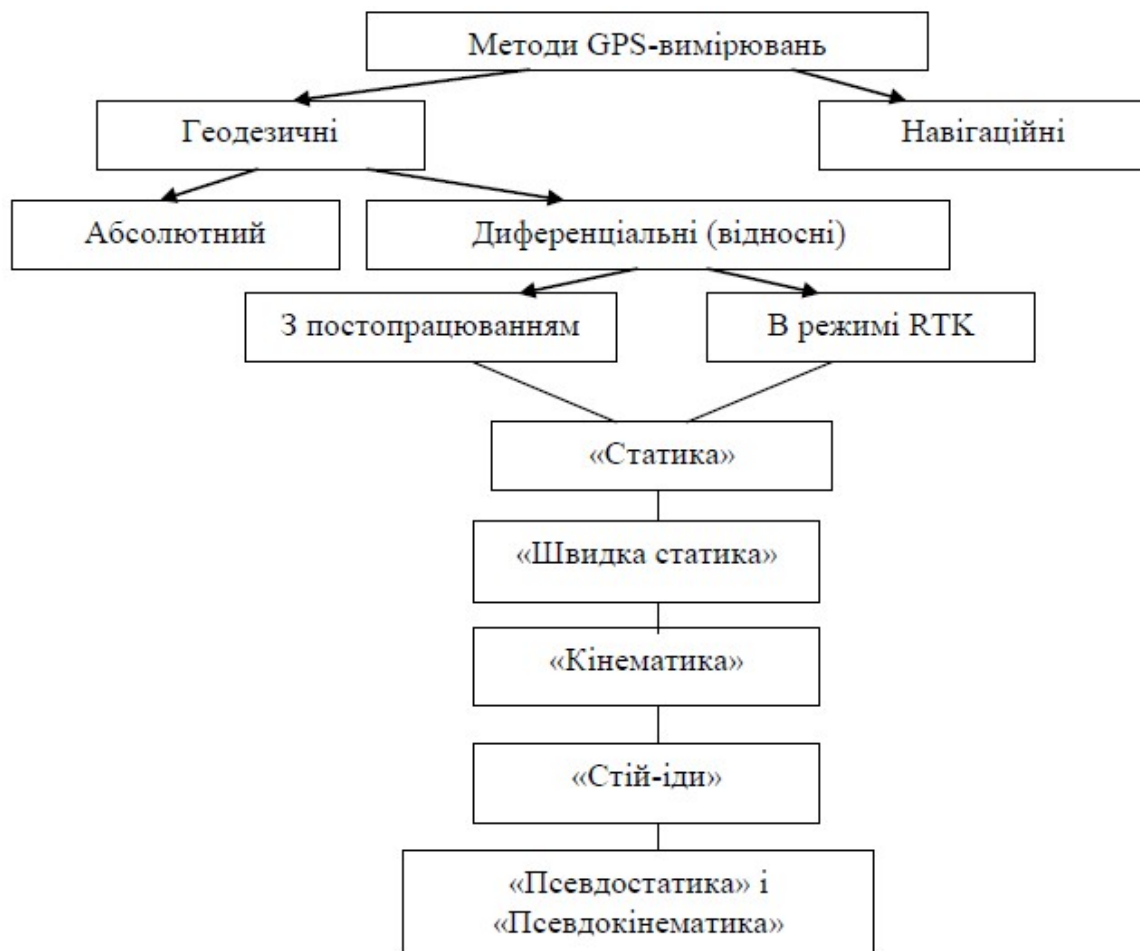


Рис. 10.6. Класифікація методів GPS-вимірювань [11]

Таблиця 10.2

Сфери застосування методів GPS-вимірювань

Метод GPS-вимірювань	Сфера застосування
Статичний метод	Високоточні геодезичні вимірювання, створення геодезичних мереж, моніторинг деформацій
Метод швидкої статики	Геодезія, кадастрові зйомки, будівництво, де потрібна висока точність за короткий час
Кінематичний метод	Картографування доріг, моніторинг транспортних засобів, навігація
Напів-кінематичний метод (“стій/йди”)	Геодезія, кадастрові зйомки, де потрібна висока точність під час переміщення між точками
Кінематичний метод в реальному часі (RTK)	Геодезія, будівництво, сільське господарство, точне землеробство, навігація

Беззапитний метод. Шкали часу і стандарти частоти.

У глобальних супутникових системах для визначення дальності до супутника використовується, на відміну від наземних віддалемірних вимірювань, метод з однократним проходженням сигналу уздовж траси.

Такий метод, як вже наголошувалося в темі 4 другого змістового модулю, називають беззапитним. Сигнал випромінюється з супутника і приймається наземним приймачем, і треба визначити час його розповсюдження τ . Якщо він визначений, то шукана відстань між супутником і приймачем, яку прийнято позначати буквою ρ , можна обчислити за формулою (11.1):

$$\rho = v\tau, \quad (11.1)$$

де v – середня швидкість розповсюдження сигналу уздовж траси.

Нехай супутник випромінював сигнал у момент часу t_0 , а на приймач цей сигнал прийшов у момент часу $t_0 + \tau$, і треба визначити τ .

Це можна зробити, якщо на супутнику і в приймачі мати годинники, які будуть строго синхронізовані один з одним. Сигнал супутника містить часову мітку (яку передає кожні декілька секунд). В часовій мітці "записаний" момент її відходу з супутника, визначений за годинником супутника. Приймач захоплює сигнал супутника, "прочитує" часову мітку і фіксує момент її приходу по своєму годиннику. Різниця між моментами відходу мітки з супутника і приходу її на антену приймача є шуканим інтервалом часу τ , що підлягає вимірюванню (як це робиться, описано в наступному розділі). Але для цього, підкреслимо, годинник на супутнику і в приймачі повинен йти абсолютно синхронно. Насправді це не дотримується — хоча б тому що годинник на супутнику і в приймачі має різну точність ходу (докладніше про це буде сказано нижче). Тому між показниками цих годинників, відкаліброваних по одній і тій же шкалі часу, є в кожний момент ненульова різниця — відносний відхід годинника $\Delta t_{\text{Г}}$ (величина, обумовлена неоднаковістю відхилення годинника супутника і приймача щодо еталонного часу), яка викривляє результат визначення віддалі.

Саме з цієї причини отриману з вимірювань віддаль, як вже наголошувалося вище, називають псевдовіддалю. Псевдовіддаль P пов'язана з геометричною дальністю ρ співвідношенням (11.2):

$$P = \rho + c\Delta t_{\text{атм}} + c\Delta t_{\text{Г}} \quad (11.2)$$

де Δt_{atm} — затримка сигналу в атмосфері, c — швидкість світла у вакуумі. Наявність додаткової невідомої величини Δt призводить до того, що для вимірювання відстаней до трьох супутників ми одержуємо три рівняння вигляду (11.2) з чотирма невідомими (ρ_1, ρ_2, ρ_3 і Δt_q). Тому і потрібне вимірювання до четвертого супутника, яке додає четверте рівняння, якого не вистачає. Тоді всі чотири вимірювання повинні виконуватися одночасно для забезпечення подібності величини Δt_r для цих вимірювань.

Відмітимо, що $(\rho + c\Delta t_{atm})$ у рівнянні (11.2) є електромагнітною довжиною траси, що дорівнює добутку геометричної довжини ρ на показник заломлення атмосфери (усереднений уздовж траси), або, що те ж, добутку часу розповсюдження τ на швидкість світла у вакуумі c .

Синхронізація годинника і різні шкали часу. Величина Δt_q існує завжди, але необхідно, принаймні, якомога точніше синхронізувати годинники супутника і приймача. Під цим мається на увазі прив'язка їх показників до еталонних шкал часу. Для супутникової системи еталонною шкалою є так званий системний час. Він може не співпадати з існуючими еталонними шкалами часу, але повинен бути пов'язаний з ними цілком певним чином. Розглянемо це більш детально.

Еталонами для вимірювання часу служать періодичні процеси, період яких постійний з великою точністю. Спочатку єдиним еталоном часу був період добового обертання Землі. Він визначався з двох послідовних спостережень проходження якого-небудь небесного світила через площину меридіана місця спостереження. Вже стародавні астрономи переконалися в тому, що сонячна доба виявилась на 4 хвилини більше зоряної. Це — наслідок руху Землі по орбіті (обертання Землі навкруги осі і її орбітальний рух відбуваються в одному напрямі).

Користуватися зоряним часом незручно, оскільки все наше життя пов'язане із зміною дня і ночі, тобто з сонячною добою. Проте тривалість сонячних діб змінюється протягом року внаслідок зміни швидкості руху Землі по орбіті. Тому безпосереднє визначення періоду обертання Землі виконується за спостереженням зірок, а для практичної цілі враховують різницю між зоряною і сонячною добою. Так виникло своєрідне становище, для якого ми користуємось сонячним часом, визначаючи його по зірках.

Оскільки істинна сонячна доба не залишається однаковою

протягом року, то в повсякденному житті за основну одиницю часу приймають середню сонячну добу, яка розраховується з припущення рівномірного руху Землі по орбіті. Час в такій добі називають середнім часом. Його значення змінюється із зміною географічної довготи місця: якщо в Києві 12 годин дня, то, скажімо, в Лондоні ще 10 годин ранку, тобто виникає поняття місцевого часу. Місцевий середній час на Грінвічському меридіані називають всесвітнім часом і позначають UT (Universal Time). Цей всесвітній час покладено в основу створення декількох астрономічних шкал часу.

Існує декілька модифікацій шкал всесвітнього часу. Із спостережень добових рухів зірок виходить всесвітній час UT0, не створюючи рівномірної шкали. Якщо врахувати поправку за зміщення миттєвого полюса щодо його середнього положення, одержуємо більш рівномірну шкалу UT1. Якщо врахувати, крім того, ще сезонні варіації кутової швидкості обертання Землі, одержуємо ще більш рівномірну шкалу UT2.

Нерівномірність добового обертання і орбітального руху Землі не забезпечують створення строго рівномірних шкал часу. Тому була введена ще одна шкала — ефемеридний час, названий пізніше динамічним часом.

Під ним розуміють аргумент в диференціальних рівняннях руху тіл Сонячної системи в гравітаційному полі. Цей рівномірно поточний час, що використовується під час визначення ефемерид супутників.

Будь-який час вимірюється за допомогою годинника. Годинник безперервно удосконалювався (маятниковий годинник, кварцовий годинник), і було встановлено, що тривалість доби непостійна — вона може змінюватися в обидві сторони на тисячні і навіть соті частки секунди.

До середини XX століття стало ясно, що точність кращого годинника перевершила точність нашого природного еталона часу — доби. Можливості астрономічних методів вимірювання часу виявилися вичерпаними.

Атомний час і стандарти частоти. Принципово нові і більш точні методи вимірювання часу прийшли з радіоспектроскопії і квантової електроніки. Було встановлено, що кожний атом або молекула вибірково поглинають або випромінюють не тільки світло, але і радіохвилі певної довжини хвилі λ або частоти f , і, що саме головне, ці довжини хвиль і

частоти характеризуються неперевершеною постійністю. Це дало змогу створити квантові стандарти частоти, а, отже, і часу (пригадаємо, що частота — це величина, зворотна періоду, тобто часу одного коливання), і побудувати шкалу **атомного часу** АТ, що задається конкретним атомним або молекулярним еталоном.

Ця шкала практично абсолютно рівномірна. В ній одиницею вимірювання є атомна секунда — проміжок часу, протягом якого здійснюється 9 192 631 770 коливань, що відповідають резонансній частоті енергетичного переходу між рівнями надтонкої структури основного стану атома цезію-133 (Cs^{133}). Іншими словами, за атомну секунду виконується кількість періодів коливань цезієвого генератора, що чисельно дорівнює його частоті в герцах, яка складає $\approx 9\,192\,631\,770$ Гц ($\approx 9,2$ ГГц). Стабільність цієї частоти дуже висока (тобто відносна нестабільність $\Delta f/f$, де Δf відхилення частоти, дуже мале). Окрім цезієвого, як стандарти частоти використовуються також рубідієвий і водневий генератори. Останній має найвищу стабільність. Дані про стабільність різних генераторів приведені в табл. 11.1. Оскільки ці генератори грають роль високоточного годинника, в таблиці наведені також величини, що характеризують "точність ходу" цього годинника.

Таблиця 11.1

Стабільність ходу генераторів частоти

Тип генератора	Нестабільність за добу	Відповідний відхід годинника
Рубідієвий	$5 \cdot 10^{-12}$	0,15 сек за 1000 років
Цезієвий	$3 \cdot 10^{-13}$	0,01 сек за 1000 років
Водневий	$2 \cdot 10^{-14}$	0,4 сек за мільйон років

Існує Міжнародний атомний час IAT (International Atomic Time), встановлюваний на основі показників атомного годинника в різних метрологічних установах відповідно до наведеного вище визначення атомної секунди.

Оскільки шкали АТ і УТ не узгоджуються між собою, введена проміжна шкала, яка названа всесвітнім координованим часом UTC (Universal Time Coordinated). UTC — це атомний час, який корегується на 1 с, коли його розбіжність з UT1 перевищує 0,5 с. Корекція

проводиться в останню секунду 30 червня або 31 грудня, або в обидві дати.

Системний час GPS і ГЛОНАСС. Для системи GPS прийнята своя атомна шкала часу, яка позначається GPST. Час GPST був введений опівночі з 5 на 6 січень 1980 року, і він на 19 секунд менше часу IAT:

$$GPST = IAT - 19c. \quad (11.3)$$

Оскільки

$$TAI = UTC + 1c \cdot n, \quad (11.4)$$

де n – число секундних стрибків (корекцій), то зв'язок системного часу GPST зі всесвітнім координованим часом UTC встановлюється за формулою (11.5):

$$GPST = UTC - 19c + 1c \cdot n, \quad (11.5)$$

Час тече безперервно – він не піддається, на відміну від UTC, секундним скачкам корегувань, які компенсували б останній член в (11.6), і наявність цього члена призводить до того, що розбіжність GPST і UTC не залишається постійною, а міняється через корекції часу UTC.

Для системного часу ГЛОНАСС не існує відмінності від UTC на ціле число секунд, оскільки воно корегується одночасно з корекціями шкали UTC, а існує постійне зміщення на 3 години:

$$T_{\text{ГЛОНАСС}} = UTC + 03 \text{ г } 00 \text{ хв. } 00 \text{ с.} \quad (11.6)$$

По ідеї, в системному часі повинні функціонувати всі підсистеми супутникової системи. Але на практиці це нереально, оскільки для цього в кожній підсистемі потрібно використовувати однотипні високоточні еталони часу і частоти. Такі еталони встановлюються на супутниках і на центральній наземній станції, але мати подібні громіздкі і дорогі еталони в кожному приймачі не представляється можливим, і в приймачах ставлять звичайний кварцовий годинник (генератори) з нестабільністю порядку 10^{-8} . Платою за можливість мати в приймачі "низько стабільний компактний і дешевий годинник" служить поява в рівняннях додаткової невідомої величини Δt_q , що призводить до необхідності вимірювання псевдовіддалі ще до одного (четвертого) супутника. Через неоднакову точність годинників розрізняють бортову шкалу часу (на супутнику) і шкалу часу споживача (приймача). Їх прив'язують до системної шкали шляхом врахування спеціально визначуваних поправок. Поправки

годинника супутника, одержувані внаслідок стеження за супутником з наземних станцій, закладають в пам'ять бортового комп'ютера і транслюють на приймач, а поправки годинника приймача визначають як невідомий параметр з обробки результатів спостережень [1, 5].

Контрольні запитання

1. Що розуміється під терміном "супутникове позиціонування"?
2. На площині є дві тверді точки А і В і точка Р, що визначається. Що необхідно зробити для визначення її місця положення?
3. Яка висота орбіт супутників в системі "Транзит"?
4. Куди спрямована вісь Z в геоцентричній прямокутній системі координат?
5. В якій площині лежать координати осей X і Y в геоцентричній прямокутній системі координат?
6. Що являлось головним недоліком доплерівських супутникових систем?
7. Які координати найбільш зручні для супутникової геодезії?
8. Як одержуються точки віддалемірним методом під час визначення їх просторового положення?
9. В чому полягає особливість супутникового позиціонування?
10. Вкажіть назви глобальних супутникових систем, які працюють в системі координат ПЗ-90 та WGS-84?
11. Що називають ефемеридами супутника?
12. Приймач фіксує момент приходу сигналу з супутника за своїм часом. Як він дізнається про те, коли був відправлений сигнал з супутника?
13. За яких умов псевдовіддаль відмінна від геометричної дальності, виправленої поправкою за вплив атмосфери?
14. Чи забезпечує світовий час UT створення рівномірної шкали часу?
15. Який із стандартів частоти забезпечує саму високу стабільність?
16. Чи являється світовий координований час UTC атомним часом?
17. Яка відмінність між координованим часом UTC та системним часом GPS?
18. Що таке електромагнітна довжина траси?

19. В чому відмінність між координованим часом UTC та системним часом ГЛОНАСС?

20. Чому дорівнює відхід частоти рубідієвого, цезієвого, водневого стандартів за 100 років?

21. На скільки секунд системний час GPST став більше всесвітнього координованого часу UTC, якщо останнє було піддане корекції 21 раз?

22. Яка висота орбіт супутників в системі "Транзит"?

Лекції 14,15. Програмне забезпечення Digital для опрацювання геодезичних вимірювань

Функціонал модуля Geodesy програмного забезпечення Digital для опрацювання геодезичних вимірювань. Digital забезпечує автоматизацію геодезичних робіт від обробки польових вимірів до створення обмінних файлів, кадастрових планів і технічної документації. Не потребує додаткових програм. Створює графічні і текстові документи на основі шаблонів, що дає можливість максимально автоматизувати процес і легко адаптувати його під будь-які вимоги.

Програму вже багато років використовують досить значна кількість організацій, які здійснюють топографо-геодезичну, картографічну та землевпорядну діяльність. Це дає змогу легко обмінюватися цифровими картами без втрати їх змісту та оформлення.

Модуль Geodesy – це модуль, призначений для обробки геодезичних польових вимірювань.

Дає змогу імпортувати дані з більшості файлів електронних тахеометрів, або вводити журнал вимірювань вручну, будувати різні види теодолітних ходів, проводити їх спільне врівноваження з видачею звітів. Виконує контроль помилок вхідних даних з можливістю коригування вимірювань. Отримані координати пікетів передаються в основний модуль Digital.

Модуль Geodesy викликається з панелі управління ЦФС, яка, своєю чергою, викликається командою головного меню картографічного редактора Растр > Орієнтування. Після того, як панель ЦФС Дельта з'явиться на екрані, натисніть кнопку Геодезія. Деякі можливості цього модуля:

- ручне введення вимірювань за польовим журналом;
- відкриття файлів вимірювань, імпортованих із популярних моделей електронних тахеометрів;
- зрівнювання теодолітних ходів, у тому числі систем ходів;
- розрахунок пікетів тахеометричної зйомки;

Модуль GeoTrans – це підсистема перетворення координат точок, яка дає можливість здійснювати перерахунок у зручному вікні. Програма працює з описами систем координат із файлу Datums.ini.

Підсистема GeoTrans викликається з панелі керування ЦФС "Дельта", на якій слід знайти та натиснути кнопку Координати.

Інтерфейс програми вкрай простий:

– На закладці Вихідні дані слід вказати вихідну систему координат, формат вхідних даних і, власне, самі дані, які можуть бути введені вручну у відповідні поля введення, так і бути представленими у вигляді текстового файлу.

– Закладка Результати повністю ідентичні попередній закладці. Тут слід вибрати цільову систему координат, а також задати формат та спосіб видачі результатів.

– Перерахунок здійснюється за командою Виконати внизу вікна.

Опрацювання теоделітного ходу в модулі Geodesy. Щоб розпочати роботу переходимо в розділ «Хід» в панелі та обираємо «Опорні точки» (рис. 12.1).

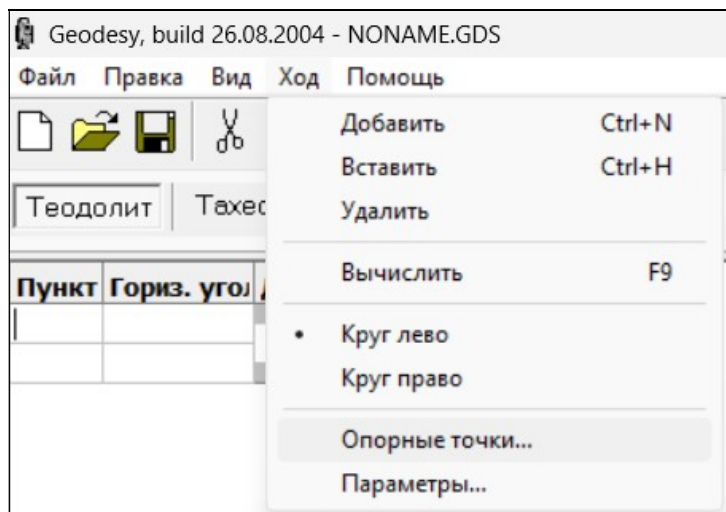


Рис. 12.1. Контексне меню «Хід»

Та задаємо координати та дирекційний кут нашої першої точки (рис. 12.2).

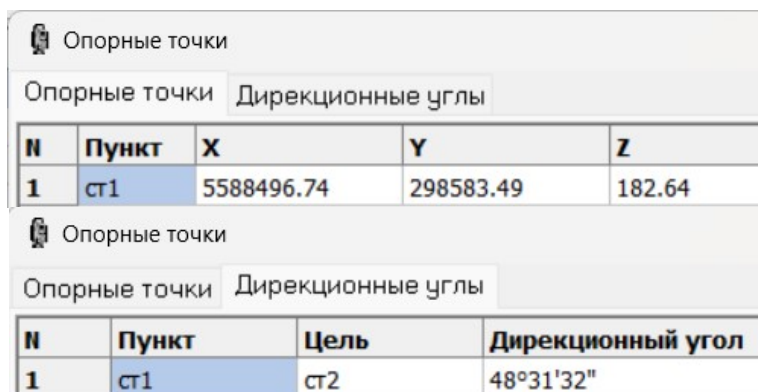


Рис. 12.2. Інтерфейс «Опорні точки»

Після починаємо вводити наші кути які ми виміряли раніше за допомогою теодоліта, та відстань між станціями, після чого ми отримаємо наш полігон на правому екран (рис. 12.3).

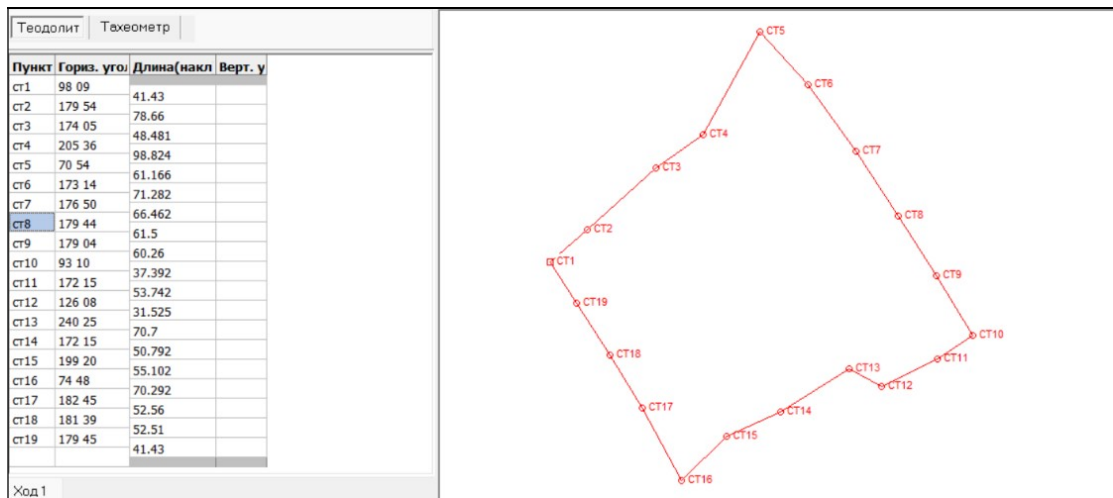


Рис. 12.3. Інтерфейс «Теодоліт»

Опрацювання результатів тахеометричного знімання в Geodesy. Як тільки ми завершили роботу з теоделітним ходом, можемо переходити на наступний етап — тахеометрія. Вводимо інформацію про станцію, абсолютну висоту, висота приладу та місце нуля (рис. 12.4).

1)

Пункт	Дир. угол	Отметка	Нули	Н і	МО

2)

Пункт	Дир. угол	Отметка	Нули	Н і	МО
ст1	48 31 32	182.637	0	1.65	-0 30

Рис. 12.4. Відомості про пікети

Переходимо до пікетів які ми відсняли, записуємо номер пікету, горизонтальний та вертикальний кути, відстань від станції до пікету. Як тільки всі дані випишемо отримаємо результат (рис. 12.5).

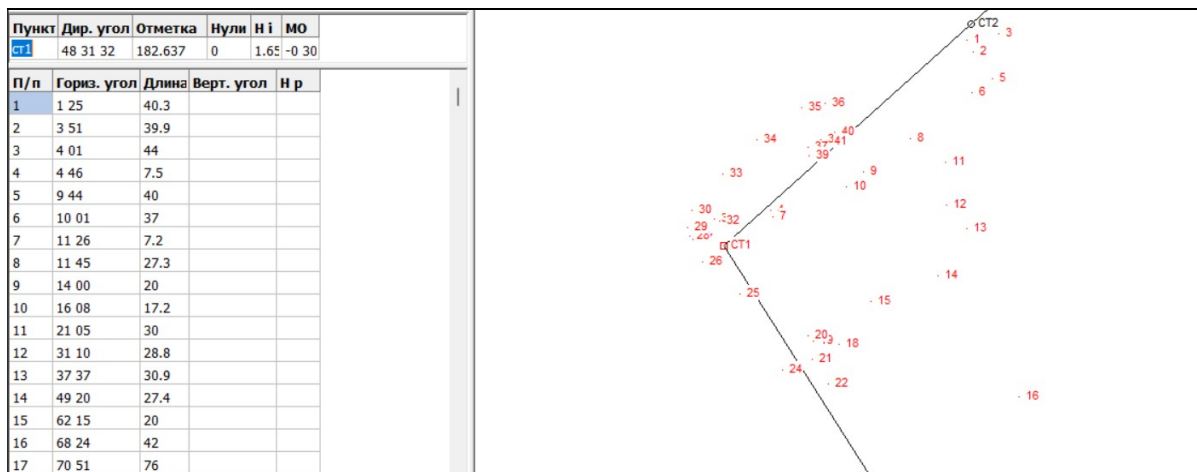


Рис. 12.5. Відображення пікетів станції «ст1»

Так робимо з усіма станціями та пікетами, у разі завершення маємо результат (рис. 12.6).

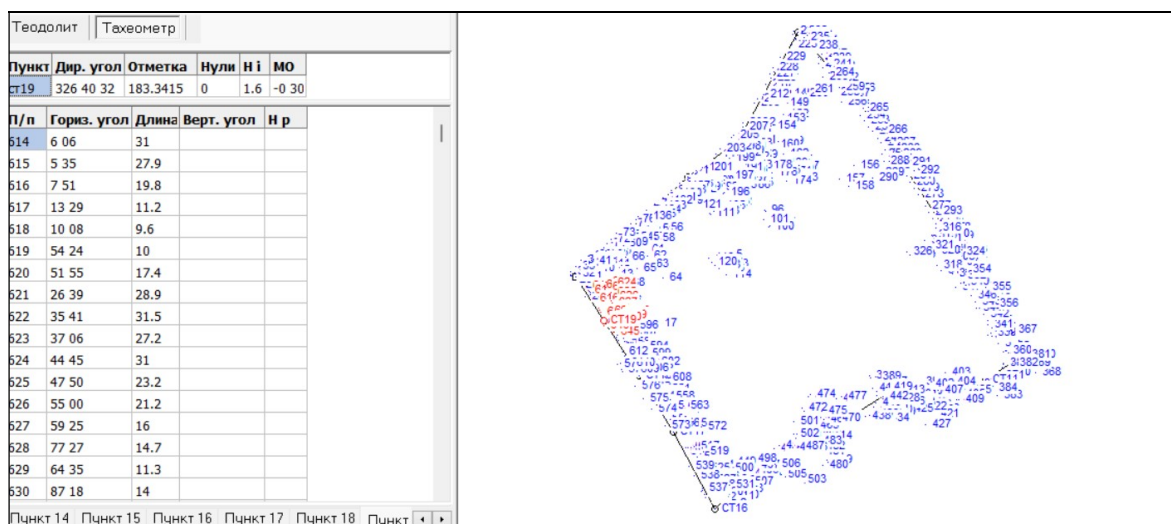


Рис. 12.6. Відображення пікетів станцій тахеометричного знімання

Опрацювання даних у картографічному редакторі ПЗ Digital.

Після завершення внесення даних, можемо цей файл переносити у картографічний редактор Digital та робити топографічний план, розставляючи умовні знаки. Це можна зробити за допомогою функції в панелі “Файл” після “Експорт в DMF”.

Обираємо “Пікети” і зберігаємо на комп’ютері в зручне місце. Відкриваємо Digital та відкриваємо в ньому наш файл .DMF. Розставляємо умовні знаки та завершуємо топографічний план (рис. 12.7, рис. 12.8).

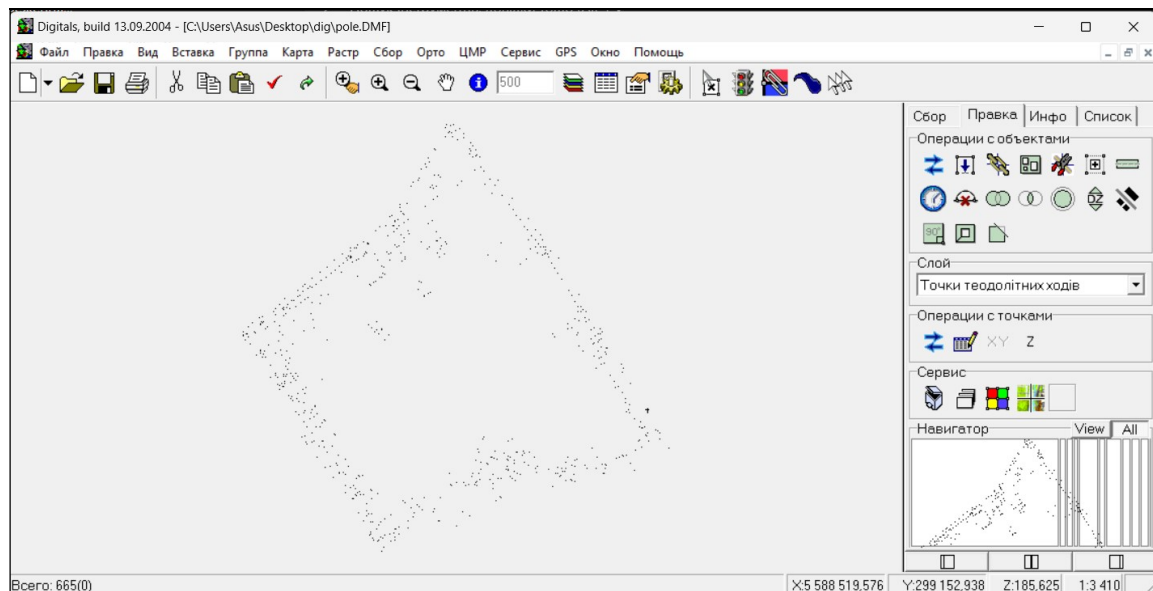


Рис. 12.7. Интерфейс картографического редактора ПЗ Digitalis

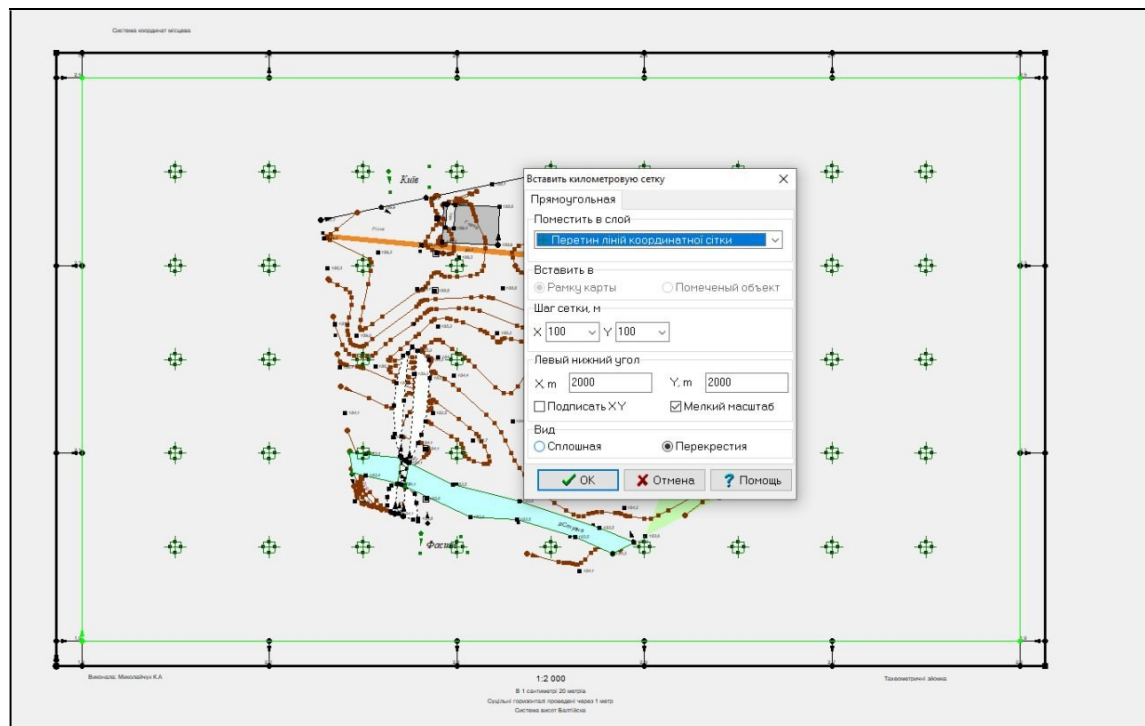


Рис. 12.8. Пример построения сетки

Безпосередньо перед збором об'єктів потрібно вибрати шаблон, за яким потрібно збирати об'єкти. Шаблон об'єкта вказує програмі, якої форми буде об'єкт. Для вибору шаблону потрібно натиснути відповідну кнопку на правій інструментальній панелі або вибрати шаблон збору через контекстне меню. Якщо жодна із кнопок не вибрана, то програма працюватиме в режимі збору незамкненої полілінії. Для замикання об'єкта в цьому випадку потрібно використовувати клавішу F3.

Векторизація об'єктів місцевості за даними тахеометричної зйомки у ПЗ Digitals – це спосіб представлення об'єктів і зображень, заснований на використанні елементарних геометричних об'єктів: точки, лінії, полігони.

Збір векторних об'єктів за результатами наземного знімання здійснюють за пікетами та польовими абрисами. Тому перед збором об'єктів необхідно обов'язково підписати номери пікетів.

Для побудови планових об'єктів необхідно:

1. Перейти на закладку Збір, після чого курсор набуде вигляду хреста.
2. У списку Активний шар вибрати тип об'єкту, який будемо зараз збирати (на закладці під шаблонами збору буде виведено умовний знак).
3. Вибрати шаблон збору об'єкта.
4. Зареєструвати першу точку об'єкта, підвівши курсор миші до необхідного пікету і натиснувши ліву кнопку миші. Під час наведення курсору на існуючу точку (вузол) біля нього з'являється зафарбований квадрат, який сигналізує про те, що курсор попав на існуючий вузол. Якщо поточний шаблон – точковий об'єкт, то реєстрація однієї точки завершує збір об'єкту, і команду завершення збору виконувати не потрібно. Так само необхідно зареєструвати всі інші поворотні точки об'єкту. Для поточного шаблону – лінія – реєстрація двох точок (для прямокутника - трьох) завершує збір об'єкту автоматично.
5. Замкнути об'єкт для шаблону збору – полілінія, і завершити його командою закінчення збору (клавіша F5).

Під час збору доступний ряд допоміжних сервісних команд, які можна викликати із контекстного меню чи натиском на відповідну клавішу клавіатури:

- автореєстрація (кнопка F2)
- автоматичний збір точок з кроком 1 мм в масштабі плану. Крок та параметри автоматичної реєстрації можна змінити, викликавши Сервіс / Налаштування / Збір / Крок автореєстрації;
- замкнути об'єкт (F3) – замикає об'єкт (для шаблону збору полілінія);
- вставити розрив (F4) – вставляє ознаку розриву в поточній точці;
- завершити об'єкт (F5) – завершує збір поточного об'єкту;
- видалити точку (F8) – видаляє останню точку об'єкта, який збираємо;

- відмінити об'єкт (Backspace) – знищує об'єкт;
- вставити дугу (Ctrl-A) – замінює останні три точки об'єкта дугою;
- захопити точку (P) – приєднує точку до найближчого існуючого вузла;
- захопити лінію (L) – приєднує точку до найближчої існуючої лінії

Особливості збору (векторизації) об'єктів. Під час векторизації об'єктів, які мають спільні контури, та потрібно зібрати спочатку важливіший об'єкт (з точним контуром), а збір другого виконати у такій послідовності:

- вибрати шаблон збору;
- зібрати першу точку;
- перший спільний вузол обох об'єктів: векторизацію виконувати лише за годинниковою стрілкою;
- зібрати всі «нестільні» вузли; останньою зафіксувати останню спільну точку обох об'єктів (п).

Використовувати шаблон збору полігон слід обережно, у випадку, коли об'єкт має спільні ділянки не з одним, а кількома об'єктами. Тут, можливо, ефективним буде використання кнопки «Р», яка «садить» поточний вузол на найближчий існуючий.

Шар, який присвоєний об'єкту під час збору, можна змінити на інший. Для цього потрібно перейти на закладку Правка, виділити об'єкт і у випадковому списку Шар вибрати новий шар.

Для того щоб змінити колір лінії чи заливки, потрібно зайти в Менеджер шарів і в правій частині вікна змінити атрибути лінії і заливки для потрібного шару. Можна змінювати умовні знаки, що зображують об'єкти, а також створювати нові шари (рис. 12.9).

Після створення об'єкта слід ввести його семантичні характеристики в режимі Інфо. Введення даних по об'єкту завершуємо кнопкою ОК. Для зміни списку доступних параметрів шару, можна використати подвійне натискання лівої кнопки миші на заголовку Параметри панелі Інфо. Варто окремо зупинитись на векторизації таких об'єктів, як кар'єри, ями, укуси. Для якісного відтворення такого умовного знаку необхідно в менеджері умовних знаків створити лінійний умовний знак. Зверніть увагу на те, що в цьому знаку відсутня горизонтальна лінія, а на закладці Edit активна ознака «еластик».

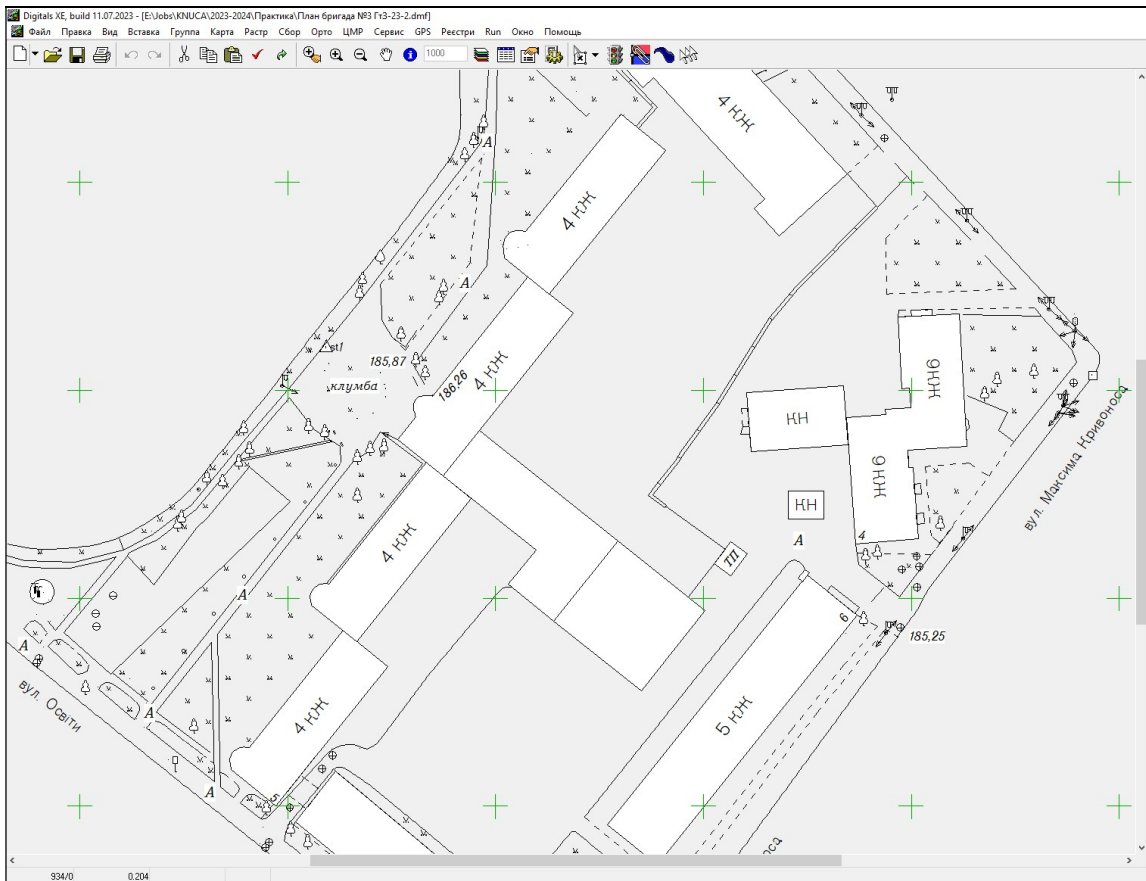


Рис. 12.9. Фрагмент топографічного плану М 1:500
у картографічному редакторі ПЗ Digital

Автоматизація формування топографічного плану полегшує і пришвидшує процес виробництва, але водночас до побудови цифрової моделі місцевості висуваються нові вимоги, а саме дотримання правил топології.

Контрольні питання

1. Які основні модулі містяться у ПЗ Digital?
2. Що треба спочатку виконати у модулі Geodesy перед опрацювання даних тахеометричної зйомки?
3. Які основні команди є у картографічному редакторі ПЗ Digital для векторизації геопросторових об'єктів?
4. Які додаткові ресурси можна підключити у ПЗ Digital для векторизації?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Дослідження точності визначення координат сфер лазерним сканером FARO FOCUS S120* / О. В. Адаменко [та ін.] // Просторовий розвиток. – 2023. – № 5. – С. 240–257. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.5.240-257>
2. *Дослідження метрологічних характеристик компенсаторів оптичних нівелірів* / О. В. Адаменко // Містобудування та територіальне планування. – 2015. – № 58. – С. 17-24.
3. *Сучасний стан нормування точності геодезичних робіт під час будівництва інженерних споруд* / О. В. Адаменко // Інженерна геодезія. – 2014. – № 60. – С. 6-11.
4. Баран. П. І. Інженерна геодезія / П. Баран – К.: ПАТ«ВІПОЛ», 2012. – 618 с.
5. *Дослідження впливу температури на зміну розміру контрольних лінійок із використанням індикатора годинникового типу* / А. Й. Віват [та ін.] // Технічні науки та технології. – 2020. – № 3 (21). – С. 310-318. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-310-318](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-310-318)
6. *Дослідження точності визначення координат GNSS методом в режимі RTK* / А. Й. Віват [та ін.] // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2011. – № 74. – С. 52-59.
7. *Дослідження методики застосування скануючого тахеометра TOPCON IS301 для побудови просторових моделей архітектурних форм* / А. Й. Віват [та ін.] // Інженерна геодезія. – 2019. – № 67. – С. 52-59. DOI: <https://doi.org/10.32347/0130-6014.2019.67.35-45>
8. Геотроніка. Конспект лекцій.-метод. вид. для студентів геогр. факультету, А.В. Уль. – Луцьк: РВВ "Вежа-Друк", 2022. – 124 с.
9. *Дослідження точності хмари точок методом наземного лазерного сканування* / В. Глотов [та ін.] // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2019. – № 90. – С. 41-49 DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.041>
10. Електронні геодезичні прилади. Конспект лекцій /уклад. Калинич І.В., Радиш І.П., Ваш Я.І.– Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2021р. – 156 с.
11. Електронні геодезичні прилади : навч. пос. / І. Ф. Рій, О. І. Бочко, О. Ю. Біда – Львів : «ГАЛИЧ-ПРЕС», 2021. – 336 с.: іл.

12. Методи збирання геопросторових даних для топографічного картографування / Ю.О. Карпінський [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2018. – № 35(1). – С. 204-211.

13. Кінь Д. О. Удосконалення методів геодезичних і картометричних обчислень у геоінформаційному середовищі: дис. доктор філософії: 193 / Кінь Данило Олексійович: Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2024. – 279 с. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.31267.67365>

14. Костецька Я. М. Геодезичні прилади. Частина II. Електронні геодезичні прилади. – Львів: ІЗМН, 2000. – 324 с.

15. Литвин М. *Розробка методик і програм спільної обробки GPS-, РНДБ- і лазерних спостережень на геодинамічному майданчику* : дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.мат. наук. Київ, 2008. 111 с.

16. Лізунков, О. В., & Попов, Г. А. (2010). Історична еволюція геодезичних приладів на прикладі нівеліра. *Наукові записки*. Вип.10. Частина III. Кіровоград: КНТУ, с. 219-222 URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/ef2e5855-9801-4800-a090-e80f2938394d/content>

17. Мацко П.В., Голубєв А.М. Геотроніка та картографія: Навчальний посібник. 2-е вид. випр.. і доповн. – Херсон, ХДУ, 2007. 184 с.

18. Почапинська І. *Створення великомасштабних топографічних планів за даними мобільного лазерного сканування* : магістерська робота. Київ, 2022. 91 с.

19. Сайт ТОВ НВП «Навігаційно-геодезичний центр» [Електронний ресурс]: – Режим доступу : <https://ngc.com.ua/ua/index.html/> (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

20. Тельнов В.Г. Геодезія: навч. посіб. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка». – 2019. – 316 с.

21. *Аналіз технологічних можливостей сучасних наземних лазерних сканерів* / І.С. Тревого [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2010. – № 1(19). – С. 170-176.

22. *Сучасні тенденції розвитку та класифікації електронних тахеометрів* / І.С. Тревого [та ін.] // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – № 1(17). – С. 109-115.

23. Тревого І.С., Шевченко Т.Г., Мороз О.І. Геодезичні прилади. Практикум: навчальний посібник / За загальною редакцією Шевченка Т.Г. – Львів: Видавництво Національного університету „Львівська політехніка”, 2012. -240 с.

24. Факультет ГІСУТ. Проект DAAD «Розроблення віртуального середовища з навчання технологіям діджиталізації навколишнього світу VIRSCAN3D» [Електронний ресурс] / Факультет ГІСУТ // КНУБА. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.knuba.edu.ua/faculties/gisut/kafedri-gisut/kafedra-geoinformatiki-i-fotogrammetriyi/mizhnarodne-spivrobotnictvo-kafedri-geoinformatiki-i-fotogrammetriyi/proekt-daad-rozroblennya-virtualnogo-seredovishha-z-navchannya-texnologiyam-digitalizaci%D1%97-navkolishnogo-svitu-virscan3d-2019-2021-rr-podovzhenij-do-2023r/> / (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

25. *Інженерні рішення для підвищення точності геодезичних вимірювань електронними тахеометрами* / А. Церклевич [та ін.] // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2022. – № 96. – С. 58-69. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2022.96.058>

26. Шевченко Т.Г., Мороз О.І., Тревого І.С. Геодезичні прилади: підручник / За ред. Т.Г. Шевченка. – Львів: Вид-во Націон. Ун-ту "Львівська політехніка", 2006. – 464 с.

27. *Blistan, P., & Kovanic jr, L. Geodetic methods for efficient spatial data collection.* [Електронний ресурс]. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/236031806_Geodetic_methods_for_efficient_spatial_data_collection / (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

28. *Land surveying and mapping guide for road projects. TR-510.* [Електронний ресурс]. – Department of Municipal Affairs and Transport, 2012. – Режим доступу до ресурсу: <https://jawdah.qcc.abudhabi.ae/en/Registration/QCCServices/Services/STD/ISGL/ISGL-LIST/TR-510.pdf> / (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

29. *Accuracy and Precision Analysis of Total Station Measurements.* [Електронний ресурс]. –2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:727374/> (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

30. The Processing of Single Differenced GNSS Data with VLBI Software / Y. Kwak [та ін.] // REFAG 2014: Proceedings of the IAG Commission 1 Symposium Kirchberg, Luxembourg, 13–17 October, 2014 *Springer International Publishing*. – 2017. – С. 39-46.

31. *Leica flexline TS02/TS06/TS09 User Manual* [Електронний ресурс]. – Leica Geosystems AG, 2012. – 310 р. Режим доступу до ресурсу: <https://docs.onepointsurvey.com/pdf/Leica-FlexLine-User-Manual.pdf>/ (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

32. *Procedures and best practices for trigonometric leveling in the US Geological Survey* (No. 11-D3). [Електронний ресурс]. – US Geological Survey, 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://pubs.usgs.gov/publication/tm11D3/> (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

33. *Wagner, A. A. New geodetic monitoring approaches using image assisted total stations: Doctoral dissertation*. [Електронний ресурс]. Technische Universität München, 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://mediatum.ub.tum.de/1338051/> (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

34. *Xu, G. GPS – Theory, Algorithms and Applications*, second edition, [Електронний ресурс]. – *Springer Heidelberg*, 2007, ISBN 978-3-540-72714-9. – Режим доступу до ресурсу: <https://nguyenduyliemgis.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/09/gps-theory-algorithms-and-applications-2007.pdf>/ (дата звернення: 02.12.2024). – Назва з екрана.

Навчальне видання

КІНЬ Данило Олексійович,
ЛАЗОРЕНКО Надія Юріївна,
ОНИЩУК Володимир Самвелович

ГЕОДЕЗИЧНІ ПРИЛАДИ

Конспект лекцій

Комп'ютерне верстання *А. П. Селівестрової*

Ум. друк. арк. 10,0. Обл.-вид. арк. 10,75

Електронний документ. Вид № 74/V-24.

Виконавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р